การผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อด้วยไซแลนเนสของหญ้าคา *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. และหญ้าแฝก *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash.

นางสาวสุธิดา มุลาลินน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PULPING AND XYLANASE BLEACHING OF COGON *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. AND VETIVER *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash GRASSES

Miss Suthida Mulalin

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อด้วยไซแลนเนสของหญ้าคา *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. และหญ้าแฝก *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash.
โดย	นางสาวสุธิดา มุลาลินน์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. หรรษา ปุณณะพยัคฆ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุธิดา มุลาลินน์ : การผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อด้วยไซแลนเนสของหญ้าคา *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. และหญ้าแฝก *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. (PULPING AND XYLANASE BLEACHING OF COGON *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. AND VETIVER *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash GRASSES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร.สีหนาท ประสงค์สุข, 150 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อด้วยไซแลนเนสของหญ้าคาและหญ้าแฝก เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าสองชนิดนี้ การทดลองเริ่มจากการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน คือ 7.5%, 10.0%, 12.5% และ 15.0% ของน้ำหนักหญ้าแห้ง ผลการทดลองพบว่า การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ผลผลิตที่ได้ของเยื่อลดลงเล็กน้อย ส่วนความแข็งแรงของกระดาษจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง สำหรับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อจากหญ้าคาและหญ้าแฝกคือ 10.0% ในส่วนของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของทั้งหญ้าคาและหญ้าแฝก นั้นพบว่า ค่าความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด มีค่าสูงกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือเอนไซม์ไซแลนเนสในการทำปฏิกิริยากับเยื่อเพียงอย่างเดียว ในส่วนของความแข็งแรงนั้นพบว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ ทำให้เยื่อที่ได้จากทั้งหญ้าคาและหญ้าแฝกมีความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลง หากแต่มีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น หญ้าคาถือเป็นแหล่งเส้นใยที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นกระดาษมากกว่าหญ้าแฝก เนื่องจากกระดาษจากหญ้าคาให้สมบัติด้านความแข็งแรง อันได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความต้านทานแรงฉีก มากกว่ากระดาษจากหญ้าแฝกทั้งก่อนและหลังการฟอกเยื่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต สุธิดา มุลาลินน์

ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5072520223 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : COGON GRASS / VETIVER GRASS / SODA PULPING / XYLANASE BLEACHING

SUTHIDA MULALIN : PULPING AND XYLANASE BLEACHING OF COGON *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. AND VETIVER *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash GRASSES. ADVISOR : SEHANAT PRASONGSUK, Ph.D., 150 pp.

In this research, pulping and xylanase bleaching of cogon and vetiver grasses were studied in order to compare pulp and paper properties obtained from these two grasses. Firstly, the pulping of these grasses was done at 120 °C for 2 hours by using concentration of sodium hydroxide of 7.5%, 10.0%. 12.5% and 15.0% based on oven dried grass weight. The results indicated that higher sodium hydroxide concentration caused slightly lower pulp yield. Strength properties increased with increasing sodium hydroxide concentrations. However, too high sodium hydroxide concentrations decreased the strengths properties. It was also found that the optimum sodium hydroxide concentration for cogon and vetiver grasses pulping was 10.0%. For xylanase combined with H_2O_2 bleaching of cogon and vetiver grasses, the results indicated that pulp brightness after bleaching was higher than using only xylanase or H_2O_2. For strength properties, it was found that xylanase combined with H_2O_2 bleaching for both pulps from cogon and vetiver grasses led to lower tensile strength and burst strength but higher tear resistance. Additionally, cogon grass seemed to be a more attractive fiber source for papermaking than vetiver grass because paper made from cogon grass provided better strength properties in terms of tensile strength, burst strength and tear resistance than vetiver grass both before and after pulp bleaching.

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

Academic Year : 2008 Advisor's Signature :

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ ตลอดจนชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. หรรษา ปุณณะพยัคฆ์ และ อ.ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโครงการวิทยาเพื่อพื้นถิ่นตามแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนตลอดงานวิจัย

ขอบคุณ เพื่อน พี่และน้องๆ ในสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีการพิมพ์และภาควิชาพฤกษศาสตร์ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนด้านการเรียนและการวิจัยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ต

บทที่

บทที่ 1 บทนำ..... 1

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... 5

2.1.1 อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ..... 5

2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อ..... 5

2.1.3 การผลิตเยื่อ..... 14

2.1.4 การฟอกเยื่อ..... 14

2.1.5 การฟอกเยื่อแบบชีวภาพ..... 15

2.1.6 ขั้นตอนการฟอกเยื่อ..... 15

2.1.7 สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ..... 16

2.1.8 กระบวนการผลิตกระดาษ..... 17

2.1.9 ไซแลน..... 20

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 22

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 24

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี..... 24

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย..... 24

3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 24

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 26

3.2.1 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝก 26

บทที่ หน้า

3.2.2 ศึกษาผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 29

3.2.3 ศึกษาผลของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 31

3.2.4 ศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 33

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล..... 35

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 36

4.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตเยื่อจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 36

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 36

4.1.2 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 39

4.1.3 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 39

4.1.4 ความยาวและความกว้างของเส้นใยของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 39

4.2 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 41

4.2.1 ความหนาแน่นและความเรียบ..... 41

4.2.2 ความแข็งแรงต่อแรงดึง..... 43

4.2.3 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ..... 44

4.2.4 ความต้าทานแรงฉีก..... 46

4.2.5 ความขาวสว่างของกระดาษ..... 47

4.2.6 ความทึบแสงของกระดาษ..... 49

4.3 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 51

4.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังฟอก..... 51

4.3.2 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก..... 52

4.3.3 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก..... 53

4.3.4 ความหนาแน่นและความเรียบ..... 54

4.3.5 ความแข็งแรงต่อแรงดึง..... 56

4.3.6 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ..... 58

4.3.7 ความต้านทานแรงฉีก..... 60

บทที่ หน้า

4.3.8 ความขาวสว่างของกระดาษ..... 63
4.3.9 ความทึบแสงของกระดาษ..... 65
4.3.10 ภาวะที่เหมาะสมในการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 70
4.4 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสต่อเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคา และหญ้าแฝก..... 71
4.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังฟอก..... 71
4.4.2 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 71
4.4.3 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 72
4.4.4 ความหนาแน่นและความเรียบ..... 73
4.4.5 ความแข็งแรงต่อแรงดึง..... 75
4.4.6 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ..... 76
4.4.7 ความต้านทานแรงฉีก..... 77
4.4.8 ความขาวสว่างของกระดาษ..... 79
4.4.9 ความทึบแสงของกระดาษ..... 80
4.4.10 ภาวะที่เหมาะสมในการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 83
4.5 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเยื่อ และกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 84
4.5.1 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก..... 84
4.4.2 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก..... 85
4.4.3 ความหนาแน่นและความเรียบ..... 85
4.4.4 ความแข็งแรงต่อแรงดึง..... 87
4.4.5 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ..... 89
4.4.6 ความต้านทานแรงฉีก..... 91
4.4.7 ความขาวสว่างของกระดาษ..... 93
4.4.8 ความทึบแสงของกระดาษ..... 95
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 101
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 101
5.1.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตเยื่อจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 101

บทที่ หน้า

5.1.2 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 101
5.1.3 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสต่อเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 102
5.1.4 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 102
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 103
รายการอ้างอิง..... 104
ภาคผนวก 107
ภาคผนวก ก การเตรียมเยื่อและสารเคมี..... 108
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง..... 113
ภาคผนวก ค ข้อมูลทางสถิติ..... 134
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 150

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ชื่อต่างๆ ของหญ้าคา	7
2.2	ชื่อต่างๆ ของหญ้าแฝก	8
2.3	สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ	16
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกก่อนการผลิตเยื่อ	36
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังผลิตเยื่อ	37
4.3	ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย	37
4.4	ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก	39
4.5	ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก	39
4.6	ความยาวและความกว้างของเส้นใยจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก	40
4.7	ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อสมบัติของเยื่อ	40
4.8	ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก	42
4.9	ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก	42
4.10	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก	43
4.11	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก	45
4.12	ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก	45
4.13	ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก	47
4.14	ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก	48
4.15	ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อสมบัติของกระดาษ	50
4.16	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก	50
4.17	ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	53
4.18	ค่าสภาพรระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	54

ตารางที่ หน้า

4.19 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 55
4.20 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 56
4.21 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 57
4.22 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 59
4.23 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 61
4.24 ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 63
4.25 ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 65
4.26 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าคา..... 67
4.27 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าแฝก..... 69
4.28 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก..... 71
4.29 ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 72
4.30 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 73
4.31 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 74
4.32 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 74
4.33 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 75

ตารางที่		หน้า
4.34	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส.....	77
4.35	ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส.....	78
4.36	ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส.....	80
4.37	ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส.....	81
4.38	ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและชนิดของหญ้าที่มีผลต่อสมบัติเยื่อและกระดาษ.....	82
4.39	ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	84
4.40	ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	85
4.41	ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	86
4.42	ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	87
4.43	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก....	88
4.44	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	90
4.45	ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	92
4.46	ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	94
4.47	ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	95
4.48	ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าคา.....	97
4.49	ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าแฝก....	99
ข.1	ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	113
ข.2	ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	113
ข.3	ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	114
ข.4	ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	114
ข.5	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก....	115

ตารางที่ หน้า

ข.6 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 116
ข.7 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..... 117
ข.8 ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 118
ข.9 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 118
ข.10 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 119
ข.11 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 119
ข.12 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 120
ข.13 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 121
ข.14 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 122
ข.15 ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 123
ข.16 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 123
ข.17 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 123
ข.18 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 124
ข.19 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 124
ข.20 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 125

ตารางที่ หน้า

ข.21 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 125
ข.22 ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 126
ข.23 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 126
ข.24 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 127
ข.25 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 127
ข.26 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 128
ข.27 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 130
ข.28 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 132
ค.1 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 134
ค.2 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 135
ค.3 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 135
ค.4 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 136
ค.5 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 136
ค.6 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 137

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

ค.7 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 138
ค.8 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 138
ค.9 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 139
ค.10 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 140
ค.11 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 141
ค.12 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 142
ค.13 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่าง ๆ..... 143
ค.14 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่าง ๆ..... 143
ค.15 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่าง ๆ..... 144
ค.16 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 144
ค.17 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 145
ค.18 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 145
ค.19 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 146
ค.20 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 147

ตารางที่ หน้า

ค.21 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 147

ค.22 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 148

ค.23 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 149

ค.24 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ..... 149

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน.....	6
2.2	หญ้าคา.....	7
2.3	หญ้าแฝก.....	10
2.4	องค์ประกอบของเส้นใย.....	11
2.5	องค์ประกอบทางเคมีของไม้.....	12
2.6	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	12
2.7	โครงสร้างองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลส.....	13
2.8	โครงสร้างของลิกนิน.....	13
2.9	เครื่องผลิตกระดาษแบบ Fourdrinier.....	20
2.10	โครงสร้างของไซแลน.....	19
2.11	ตำแหน่งการย่อยของเอนไซม์ไซแลนเนส.....	20
3.1	เครื่องต้มเยื่อ.....	20
3.2	เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ.....	21
3.3	การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	31
3.4	การฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส	33
3.5	การฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	34
4.1	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก....	44
4.2	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	45
4.3	ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก..	47
4.3	ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	48
4.5	ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก.....	49
4.6	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5%	57
4.7	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10%.....	58

ภาพที่ หน้า

4.8 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5%..... 59
4.9 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์10%..... 60
4.10 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5%..... 62
4.11 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10%..... 62
4.12 ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5%..... 64
4.13 ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10%..... 64
4.14 ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5%..... 66
4.15 ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10%..... 66
4.16 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 76
4.17 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 77
4.18 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 79
4.19 ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 80
4.20 ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส..... 81
4.21 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 89

ภาพที่ หน้า

4.22 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 91
4.23 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 93
4.24 ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 94
4.25 ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยวัสดุที่นำมาผลิตกระดาษส่วนใหญ่จะได้มาจากลำต้นของต้นไม้ ซึ่งการนำต้นไม้มาใช้ในการผลิตกระดาษเป็นการตัดไม้ทำลายป่าและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ได้ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีความพยายามที่จะนำเส้นใยจากพืชที่ไม่ได้จากลำต้นของต้นไม้มาใช้แทน

วัชพืชจัดเป็นพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non woody plant) ที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากวัชพืชสามารถพบได้ทั่วไปในประเทศไทยและเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ทั้งปี กอปรทั้งปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีชีวภาพในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะเอนไซม์สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถลดการใช้สารเคมีและได้คุณภาพของเยื่อและกระดาษที่สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำวัชพืช ได้แก่ หญ้าคาและหญ้าแฝก มาใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษ รวมไปถึงมีการนำเทคโนโลยีชีวภาพมาใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก โดย ศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อกระดาษ ซึ่งคาดว่าการใช้เอนไซม์ช่วยในการฟอกเยื่อกระดาษจะส่งผลให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ได้หลังการฟอกดีขึ้น กล่าวคือ ค่าความขาวสว่างของเยื่อเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากเส้นใยของหญ้าคาและหญ้าแฝก

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก

1.2.3 ศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากเส้นใยของหญ้าคาและหญ้าแฝก โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 7.5, 10, 12.5 และ 15 ของน้ำหนักหญ้าแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเยื่อคือ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเยื่อไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ความยาวของเส้นใย และค่าสภาพระบายได้ แล้วนำเยื่อที่เหลือไปขึ้นแผ่นกระดาษ โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 g/m^2 และนำกระดาษที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความเรียบ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษเพื่อหาภาวะของการผลิตเยื่อที่ดีที่สุด จากนั้นนำเยื่อที่ได้จากภาวะของการผลิตเยื่อจากเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ดีที่สุดมาแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ทำการฟอกและส่วนที่ทำการฟอก โดยส่วนที่ทำการฟอกจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) การฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่ pH 10.0 ±0.2 2) การฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ 6.2 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และ 18.6 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่ pH 5.5 ±0.2 และ 3) การฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ คือ เอนไซม์ 6.2 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เอนไซม์ 6.2 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% เอนไซม์ 18.6 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% และ เอนไซม์ 18.6 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% จากนั้นนำเยื่อที่ได้ไปขึ้นแผ่นกระดาษ โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 g/m^2 แล้วนำกระดาษที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความเรียบ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อแรงฉีก เป็นต้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

การทดลองจะศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกและผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

การควบคุมคุณภาพของหญ้าอาจทำได้ยาก หากมีช่วงระยะเวลาในการตัดต่างกัน เนื่องจากปริมาณความชื้นในหญ้าอาจจะไม่สม่ำเสมอ

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การฟอกเยื่อ เป็นการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้น เนื่องจากเยื่อที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเรียบร้อยแล้วมักจะได้เยื่อที่มีความขาวสว่างที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นหากต้องการความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ควรนำเยื่อมาผ่านการฟอกเยื่อ

การฟอกเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ เพื่อลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ ซึ่งการฟอกเยื่อด้วยวิธีนี้นอกจากช่วยปรับปรุงสมบัติของเยื่อและกระดาษให้ดีขึ้นแล้วยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเอนไซม์สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลพื้นฐานของการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก รวมถึงได้ข้อมูลพื้นฐานของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ค้นคว้าเอกสาร ข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.8.2 ศึกษาวิธีการทดลองและเตรียมเครื่องมือ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง

1.8.3 วางแผนการทดลองและทำการทดลองตามขั้นตอน

1.8.4 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้และสรุปผลการทดลอง

1.8.5 เรียบเรียงเนื้อหาและเขียนวิทยานิพนธ์

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ในการเสนอผลการวิจัยจะนำเสนอตามลำดับขั้นตอนของการทดลองที่มีผลต่อคุณสมบัติกระดาษ ดังนี้

1.9.1 อิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ

1.9.2 อิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ

1.9.3 อิทธิพลของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ

1.9.4 อิทธิพลของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งของโลก ปัจจุบันอัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมนี้อยู่ในเกณฑ์สูง ทำให้โรงงานเยื่อและกระดาษต้องพยายามหาแหล่งวัตถุดิบเพื่อป้อนการผลิตให้สูงขึ้น แต่เนื่องจากปัญหาทางด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการจำกัดของป่าไม้ ทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำไม้มาใช้เพื่อผลิตเยื่อและกระดาษ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องหาแหล่งวัตถุดิบใหม่ เช่น พืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non woody plant) มาทดแทนพืชที่มีเนื้อไม้ (Wood) เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการนำวัตถุดิบที่ไม่มีเนื้อไม้มาใช้ในการผลิตกระดาษเริ่มมาตั้งแต่ หลังศตวรรษที่ 17 เป็นต้นมา จากงานวิจัยหลายงานวิจัยจะพบว่าพืชที่ไม่มีเนื้อไม้มีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นวัตถุดิบในการนำมาผลิตเยื่อกระดาษได้หลายชนิด ซึ่งปริมาณความต้องการใช้กระดาษทั้งโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปีค.ศ. 1996–1997 ปริมาณความต้องการใช้กระดาษของประชากรทั่วโลกประมาณ 300 ล้านตัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเป็น 400 ล้านตันในปี ค.ศ. 2010 [1]

2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตเยื่อเพื่อใช้ในการผลิตกระดาษ การผลิตเยื่อที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ (Wood fiber) และเส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non woody fiber)

2.1.2.1 เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ (Wood fiber)

แบ่งเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของเส้นใยคือ ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) และไม้เนื้ออ่อน (Softwood)

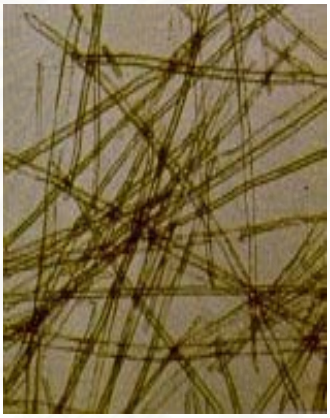
- **ไม้เนื้อแข็ง** (Hardwood)

เป็นไม้ที่มีลักษณะใบกว้าง ส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใยพืชตระกูลไม้ผลัดใบ เส้นใยมีขนาดเล็กและละเอียด ความแข็งแรงต่ำ ความยาวเส้นใยประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เจริญเติบโตเร็ว

เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเยื่อใยสั้น (Short fiber) ไม้ในกลุ่มนี้ เช่น ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) โอ๊ค (Oak) และแอสเพน (Aspen) เป็นต้น

- ไม้เนื้ออ่อน (Softwood)

เป็นพืชที่มีลักษณะใบแคบ เป็นรูปเข็ม ส่วนใหญ่เป็นพืชตระกูลสน เส้นใยมีความเหนียวและความแข็งแรงสูง ความยาวเส้นใยประมาณ 3 – 5 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2.1) เจริญเติบโตช้า เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเยื่อใยยาว (Long fiber) ไม้ในกลุ่มนี้ เช่น สนสองใบ และสนสามใบ เป็นต้น [2]



ภาพที่ 2.1 ลักษณะเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน [3]

2.1.2.2 **เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้** (Non woody fiber)

เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non woody fiber) คือ เส้นใยที่ได้จากส่วนอื่น ๆ ของพืชที่ไม่ใช่ส่วนของเนื้อไม้ พืชในกลุ่มนี้ เช่น ฝ้าย ฟางข้าว ชานอ้อย ปอแก้ว ไม้ไผ่ สับปะรด และวัชพืชต่าง ๆ เป็นต้น

วัชพืชจัดเป็นพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ ที่มีความน่าสนใจชนิดหนึ่ง เนื่องจากวัชพืชสามารถพบได้ทั่วไปในประเทศไทยและเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ทั้งปี ตัวอย่างวัชพืช เช่น กระถินยักษ์ ไมยราบยักษ์ กก เลา ธูปฤาษี และหญ้า เป็นต้น

หญ้า (Grass)

หญ้าจัดเป็นวัชพืชที่มีลิกนินอยู่จำนวนน้อย ความยาวเส้นใยประมาณ 0-3 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 0.01-0.02 มิลลิเมตร เมื่อนำหญ้ามาผลิตเป็นเส้นใย จะได้เส้นใยที่มี

สมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติเชิงแสงที่ดี ตัวอย่างของหญ้า เช่น หญ้าแขม หญ้าเนเปียร์ หญ้ากินนีสีม่วง รวมไปถึงหญ้าคาและหญ้าแฝก เป็นต้น [4]

- **หญ้าคา** (Cogon grass)

ชื่อต่างๆ ของหญ้าคาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชื่อต่างๆ ของหญ้าคา [5]

ชื่อวิทยาศาสตร์	*Imperata cylindrical* (L.) P Beauv.
ชื่อสามัญไทย	หญ้าคา คา ลาลาง แฝกคา
ชื่อสามัญอังกฤษ	Cogon grass, blady grass, lalang, kunai grass
ชื่อวงศ์	Gramineae

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

หญ้าคาเป็นพืชล้มลุกใบเลี้ยงเดี่ยว (ภาพที่ 2.2) มีอายุอยู่ข้ามฤดูและนานหลายปี ขึ้นได้ดีในดินทุกชนิด ทนต่อความร้อนและแสงแดดได้ พบได้ทั่วประเทศไทย ตั้งแต่ระดับน้ำทะเลถึงพื้นที่สูงกว่า 2,000 เมตร

ภาพที่ 2.2 หญ้าคา [6]

ลำต้น ลำต้นใต้ดินเป็นเส้นกลมสีขาวเจริญอยู่ใต้ผิวดิน แตกแขนงได้มากมายและรวดเร็ว ลำต้นเหนือพื้นดินมีลักษณะแข็ง ตั้งตรงเป็นกอ สูง 0.3-1.5 เมตร มีข้อ 2-4 ข้อ บริเวณข้อมีขน ใบเดี่ยวแข็งและสาก แผ่นใบแคบเรียว ปลายใบแหลม เส้นกลางใบขาวแตกออกจากลำต้นใต้ดิน ขอบใบมีขน ใบอ่อนมีปลอกแข็งและแหลมหุ้ม ตรงรอยต่อระหว่างแผ่นใบกับกาบใบจะมีเยื่อกันน้ำฝน (ligule) บางครั้งใบอาจจะยาวถึง 150 เซนติเมตร ช่อดอกเป็นช่อแยกแขนง (panicle) รูปทรงกระบอก ยาว 10-20 เซนติเมตร ช่อดอกมีลักษณะฟูสีขาวเงิน ดอกย่อยมีก้านดอกยาวไม่เท่ากันล้อมรอบด้วยขนสีขาว มีกลีบประดับ 2 อัน กลีบบนยาวกว่ากลีบล่าง กลีบนอกรูปไข่ ปลายแหลม โปร่งแสง มีขนและมีสีชมพูอ่อน อับเรณูมี 2 อัน ออกสีเหลืองหรือสีส้ม ยอดเกสรเพศเมียสีชมพูหรือสีม่วง ส่วนผลมีลักษณะเป็นผลแห้ง ไม่แตกรูปรี เมล็ดสีเหลือง [5]

การขยายพันธุ์ ใช้เหง้าหรือเมล็ด

ประโยชน์ ประโยชน์ของหญ้าคามีหลายประการ เช่น ในส่วนรากสดหรือรากแห้งใช้เป็นยาและในส่วนใบทำวัสดุมุงหลังคา [7]

- **หญ้าแฝก** (Vetiver grass)

ชื่อต่างๆ ของหญ้าแฝกสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชื่อต่างๆ ของหญ้าแฝก [5]

ชื่อวิทยาศาสตร์	*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash
ชื่อสามัญไทย	หญ้าแฝกลุ่ม
ชื่อสามัญอังกฤษ	Vetiver grass
ชื่อวงศ์	Poaceae

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

หญ้าแฝกเป็นพืชตระกูลหญ้าที่ขึ้นเป็นกอหนาแน่นอยู่ตามธรรมชาติ กระจัดกระจายทั่วไปในสภาพแวดล้อมต่างๆ ซึ่งในประเทศไทยจะพบหญ้าแฝกขึ้นอยู่ตามธรรมชาติ ในพื้นที่ทั่วไปจากที่ลุ่มจนถึงที่ดอนและสามารถขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิด เจริญเติบโตโดยการแตกกอ มีรากยาวและมีจำนวนมาก สามารถเติบโตหยั่งรากลึกลงไปในดินโดยไม่เป็นอุปสรรคต่อพืชที่ปลูกข้างเคียง หญ้าแฝกสามารถนำมาปลูกเพื่ออนุรักษ์ดินและน้ำได้ดี หญ้าแฝกที่พบในประเทศไทย (ภาพที่ 2.3) สามารถจำแนกออกได้ 2 ชนิด คือ หญ้าแฝกหอมหรือหญ้าแฝกลุ่ม และหญ้าแฝกดอน

หญ้าแฝกหอมหรือหญ้าแฝกลุ่ม

หญ้าแฝกหอมหรือหญ้าแฝกลุ่ม จะมีใบและมีรากยาวกว่าหญ้าแฝกดอน เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมากทำให้ดูมัน เจริญเติบโตได้ดีในที่มีความชื้นสูงและมีน้ำแช่ขัง ใบชี้ตรง เมื่อยาวเต็มที่จะหักพับเป็นมุมแหลม การขยายพันธุ์ด้วยหน่อมีอัตรารอดสูง ไม่ชอบที่ร่มรำไร เจริญเติบโตและขยายกอได้อย่างรวดเร็ว แต่ต้องมีการตัดใบจึงจะมีอายุที่ยืนยาว

หญ้าแฝกหอมนั้น ทั่วไปแล้ว เจริญเป็นกอพุ่มใบยาวตั้งตรงสูง โดยกอสูง 150-200 เซนติเมตร ใบยาว 45-100 เซนติเมตร กว้าง 0.6-1.2 เซนติเมตร ใบสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ท้องใบออกสีขาว ใบเนียนมีไขเคลือบมาก มีการแตกตะเกียงและแตกแขนงลำต้น รากหยั่งลึก 100-300 เซนติเมตร ในส่วนของสายพันธุ์สุราษฎร์ธานีนั้นมีการแตกกอค่อนข้างหลวม ทรงพุ่มกางหน่อใหญ่มีการยืดปล้องเร็ว ท้องใบสีขาว เนื้อใบหยาบ ความกว้างของใบเฉลี่ย 1 เซนติเมตร และดอกมีสีม่วงแดง

หญ้าแฝกดอน

หญ้าแฝกดอนพบทั่วไปในที่ค่อนข้างแห้งแล้ง สามารถขึ้นในที่แดดจัดและที่ร่ม กอจะเตี้ยกว่าแฝกหอม ใบหยาบมีไขเคลือบน้อยทำให้ดูใบกร้าน เมื่อยาวเต็มที่จะโค้งลงคล้ายตะไคร้ หลังปลูกเมื่อตั้งตัวได้แล้วต้องการการดูแลน้อยกว่าแฝกหอม

หญ้าแฝกดอนมีใบยาว 35-60 เซนติเมตร กว้าง 0.4-0.6 เซนติเมตร ใบสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันสามเหลี่ยมเนื้อใบหยาบ มีไขเคลือบน้อยทำให้ดูกร้านไม่เหลือบมัน ท้องใบสีเดียวกับหลังใบ แต่มีสีซีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ เส้นกลางใบสังเกตได้ชัดเจน คือ มีลักษณะแข็งเป็นแกนนูนทางด้านหลัง

ใบหญ้าแฝกดอนและหญ้าแฝกหอมจะมีอายุเท่ากัน หญ้าแฝกดอนจะมีรากที่สั้นกว่า โดยทั่วไปหญ้าแฝกที่มีอายุประมาณ 1 ปี จะมีรากลึกประมาณ 80-100 เซนติเมตร

ช่อดอกของหญ้าแฝกดอนจะมีได้หลายสี ซึ่งเป็นลักษณะปกติประจำถิ่น โดยเฉพาะกลุ่มพันธุ์อุทัยธานีและนครพนม ที่พบทั่วไปได้แก่ ช่อดอกสีขาวครีมถึงสีม่วงอมแดง

ภาพที่ 2.3 หญ้าแฝก [8]

<u>ประโยชน์</u> หญ้าแฝกสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น ใช้กรองเศษพืชและตะกอนดินที่ถูกชะล้าง ทำวัสดุมุงหลังคา ใช้เป็นวัสดุคลุมดิน ใช้รองคอกสัตว์ รวมไปถึงวัตถุดิบทำกระดาษ เป็นต้น [5]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2.3 **องค์ประกอบของเส้นใย** (Fiber structure)

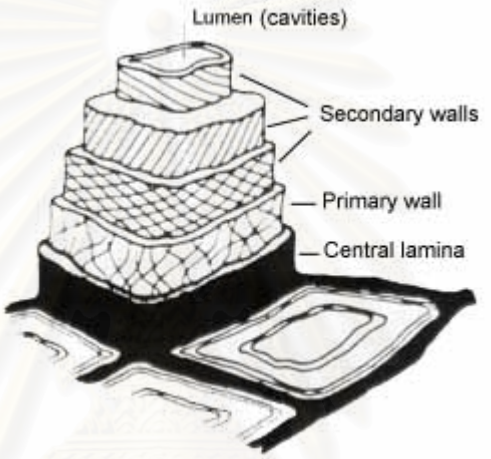
องค์ประกอบของเส้นใย ประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ Middle Lamella, Primary wall, Secondary wall และ Lumen (ภาพที่ 2.4)

- Middle Lamella

Middle lamella เป็นส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นใย ทำหน้าที่เชื่อมต่อเส้นใยให้อยู่ด้วยกันและเป็นบริเวณที่มีปริมาณลิกนินอยู่มาก

- Primary Wall

Primary Wall เป็นส่วนที่มีผนังบาง มีความหนาประมาณ 0.1-0.2 ไมโครเมตร ส่วนนี้ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพคติน โปรตีน และลิกนิน การเรียงตัวของเส้นใยภายในชั้นนี้จะมีการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยแบบสุ่ม คือไม่มีรูปแบบที่แน่นอน



ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบ ของเส้นใย [9]

- Secondary Wall

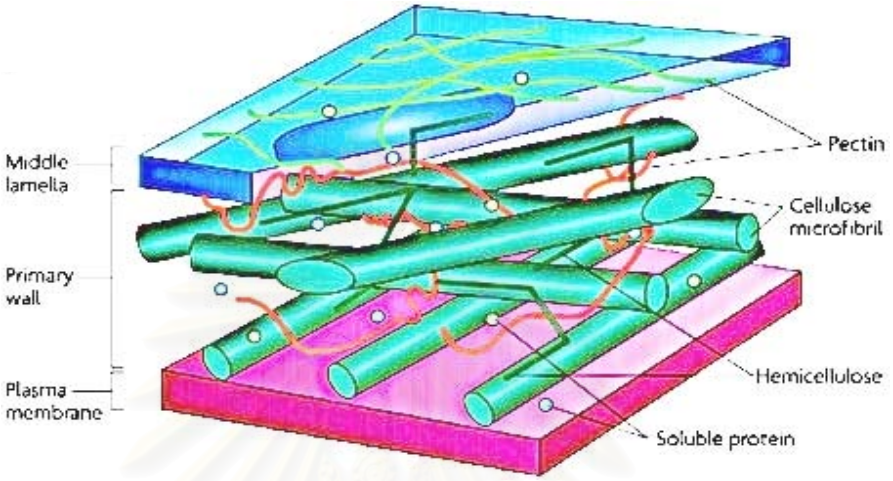
Secondary Wall ประกอบไปด้วยการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยอีก 3 ชั้น คือ S_1, S_2 และ S_3ชั้น Secondary Wall นี้จะเป็นชั้นที่หนาที่สุด โดยในส่วน S_2 มีความหนามากที่สุด คือมีเนื้อที่ประมาณ 80-95% ของเส้นใย การจัดเรียงตัวกันของเส้นใยขนาดย่อยจะเป็นไปในทิศทางเดียวซึ่งจะแตกต่างจากส่วน S_1 และ S_3 จะจัดเรียงตัวเป็นรูป S และ Z

- Lumen

Lumen คือบริเวณช่องว่างตรงกลางของเส้นใย ซึ่งจะอยู่ถัดจากชั้น secondary wall เข้าไป [10]

2.1.2.4 **เคมีของเส้นใย** (Fiber chemistry)

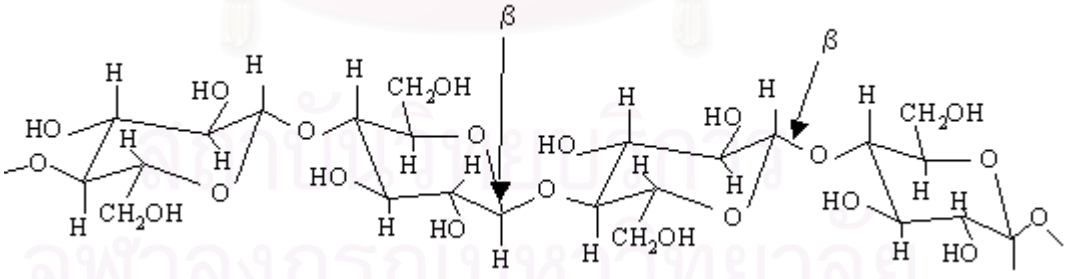
เคมีของเส้นใยจะประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารแทรก (Extractive) [2] (ภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย [11]

- **เซลลูโลส** (Cellulose)

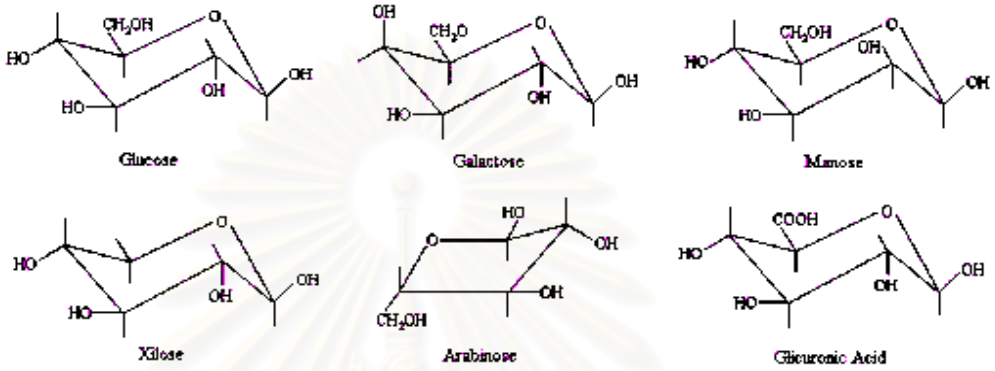
เส้นใยจะมีเซลลูโลสประมาณ 45% เซลลูโลสทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเส้นใยและให้ความแข็งแรง (ภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของเซลลูโลส [12]

- **เฮมิเซลลูโลส** (Hemicellulose)

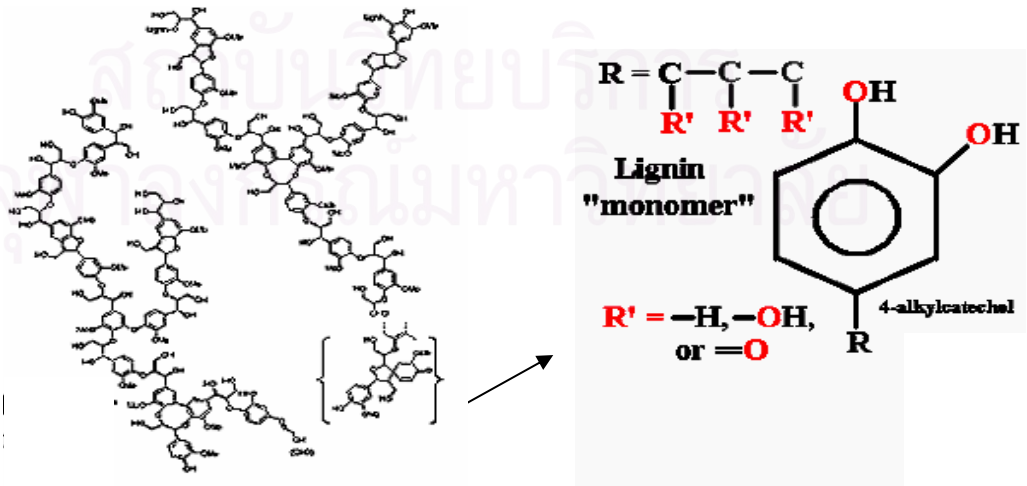
เส้นใยจะมีเฮมิเซลลูโลสประมาณ 25-35% ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองลงมาจากเซลลูโลสของเส้นใย โครงสร้างมีลักษณะเป็นกิ่งก้านอยู่ล้อมรอบเซลลูโลสและเชื่อมต่อเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน มีหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับเส้นใยในเส้นใย (ภาพที่ 2.7)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลส [13]

- **ลิกนิน** (Lignin)

เส้นใยจะมีลิกนินประมาณ 21-25% ลิกนินจะมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน ทำหน้าที่เป็นสารยึดเพื่อเชื่อมต่อเส้นใยหลายๆ เส้น ไว้ด้วยกันและให้ความแข็งแรงกับเนื้อเยื่อ (Tissue) ของพืช (ภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของลิกนิน [14]

ลิกนินจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการผลิตเยื่อ (Pulping) เนื่องจากในการผลิตเยื่อนั้นมีความต้องการเส้นใยเดี่ยว ๆ และลิกนินจะถูกกำจัดออกต่อในขั้นตอนการฟอกเยื่อ (Bleaching) เพราะปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่จะส่งผลต่อความเหลืองของกระดาษ (Yellowness) เนื่องจากลิกนินมีองค์ประกอบทางเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแสง รวมไปถึงความชื้น ทำให้เปลี่ยนสีกลายเป็นสีเหลืองขึ้นมา นอกจากนี้แล้วลิกนินยังมีผลต่อคุณภาพของเยื่อคือ ทำให้เยื่อมีความแข็งแรงต่ำ เป็นต้น

- **สารแทรก** (Extractive)

เส้นใยจะมีสารแทรกประมาณ 2-8% โดยจะเป็นสารจำพวก กรดไขมัน (Fatty acids) ยางสน (Turpenoid compound) และแอลกอฮอล์ (Alcohols) เป็นต้น [10]

2.1.3 **การผลิตเยื่อ** (Pulping)

การผลิตเยื่อ (Pulping) เป็นการพยายามแยกกลุ่มของเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการขจัดเอาลิกนินออก หรือไม่มีการขจัดเอาลิกนินออก หากแต่ใช้ความร้อนทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง เพื่อสามารถแยกเส้นใยออกได้ง่ายขึ้น การผลิตเยื่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.1.3.1 **การผลิตเยื่อเชิงกล** (Mechanical pulping)

เป็นการใช้แรงกลรวมถึงความร้อนในการแยกเส้นใยออกมา เพื่อใช้ในการผลิตกระดาษ

2.1.3.2 **การผลิตเยื่อเคมี** (Chemical pulping)

เป็นการใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพื่อให้ได้เส้นใยสำหรับใช้ในการผลิตกระดาษ ตัวอย่างของสารเคมีที่ใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น [2]

2.1.4 **การฟอกเยื่อ** (Bleaching)

การฟอกเยื่อ (Bleaching) เป็นการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้น เนื่องจากเยื่อที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเรียบร้อยแล้วมักจะได้เยื่อที่มีความขาวสว่างที่ไม่สูงมากนัก จุดประสงค์หลักของการฟอกเยื่อ คือ ต้องการให้เยื่อมีความขาวสว่างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อทำได้โดย การเปลี่ยนสารที่มีสีให้เป็นสารที่ไม่มีสี การกำจัดลิกนินออกจากเยื่อและการกำจัดสารแทรกออกจากเยื่อโดยทั่วไปแล้ว กระบวนการฟอกเยื่อแบ่งออก 2 แบบ คือ

2.1.4.1 **การฟอกลิกนิน** (Lignin Bleaching)

เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนโครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์ (Chromophore) ที่อยู่ในส่วนของลิกนินเพื่อทำให้เยื่อไม่เกิดสีเหลืองขึ้น ซึ่งวิธีนี้ไม่ได้เป็นการกำจัดลิกนินออกไปหลังจากการฟอกเยื่อ วิธีการนี้มักจะใช้กับเยื่อเชิงกลที่ยังมีลิกนินเหลืออยู่มาก ข้อดีของการฟอกลิกนินคือผลผลิตของเยื่อ (pulp yield) หลังการฟอกไม่ลดลง แต่เมื่อเยื่อสัมผัสกับแสงแดดหรือความชื้นมากๆ เยื่อจะกลับมามีสีเหลืองอีกครั้งหนึ่ง

2.1.4.2 **การกำจัดลิกนิน** (Lignin Removal)

เป็นกระบวนที่มีการใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับเยื่อเพื่อเอาลิกนินที่ตกค้างอยู่ในเยื่อออก ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ได้เยื่อคุณภาพสูงที่มีความขาวสว่างค่อนข้างคงทน ส่วนใหญ่มักใช้กับเยื่อเคมีซึ่งลิกนินถูกกำจัดออกไปแล้วบางส่วน ข้อดีของวิธีการกำจัดลิกนิน คือ ไม่ทำให้เยื่อที่ผ่านการฟอกแล้วกลับมามีสีเหลืองอีกเมื่อสัมผัสกับความชื้นและแสงแดด แต่มีข้อเสียตรงที่ผลผลิตของเยื่อหลังการฟอกจะลดลง [15]

2.1.5 **การฟอกเยื่อแบบชีวภาพ** (Biobleaching)

การฟอกเยื่อชีวภาพหลักๆ คือ การใช้เอนไซม์ช่วยในการฟอกเยื่อ บางครั้งจะเรียกการใช้เอนไซม์ช่วยในการฟอกว่า bleach boosting โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ เพื่อทำให้ความขาวสว่างของเยื่อสูงขึ้นและเพื่อช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเอนไซม์สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ [10]

2.1.6 **ขั้นตอนการฟอกเยื่อ**

การฟอกเยื่อประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การผสม (Mixing) การเกิดปฏิกิริยา (Reaction) และการล้าง (Washing)

2.1.6.1 **การผสม** (Mixing)

เป็นการผสมเยื่อกับสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ อาจมีการใช้ไอน้ำเพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสม

2.1.6.2 **การเกิดปฏิกิริยา** (Reaction)

เป็นการปล่อยเยื่อและสารเคมีให้ทำปฏิกิริยากันหลังจากการผสม โดยที่ระดับของการฟอกจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณสารเคมีที่ใส่และอุณหภูมิที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

2.1.6.3 **การล้าง** (Washing)

เป็นขั้นตอนหลังการเกิดปฏิกิริยา ขั้นตอนการล้างถือได้ว่าเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นการเอาลิกนินที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วออกจากเยื่อ เป็นการแยกสารเคมีส่วนเกินและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีออกจากเยื่อที่ฟอกแล้ว

2.1.7 **สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ**

สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ [15]

สารเคมี	หน้าที่	ชนิดของเยื่อ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Chlorine (Cl_2), C	Oxidize lignin Chlorinate lignin	Chemical	ราคาถูก ใช้งานง่าย	มีสารก่อมะเร็ง
2. Chlorine dioxide (ClO_2), D	Oxidize lignin Brighten pulp	Chemical	มีประสิทธิภาพ เยื่อขาวและเยื่อสะอาด	ราคาแพง
3. Hypochlorite (NaOCl), H	Oxidize lignin Brighten pulp	Chemical	ใช้งานง่าย	ทำให้ความแข็งแรงเยื่อลดลง
4. Hydrogen peroxide (H_2O_2), P	Oxidize lignin Decolorize lignin	Chemical, Mechanical	ใช้งานง่าย ราคาถูก	ราคาแพง เยื่อไม่ค่อยสะอาด
5. Hydrosulfite ($Na_2S_2O_4$), Y	Reduce lignin Brighten pulp	Mechanical	ใช้งานง่าย ราคาถูก	ประสิทธิภาพในการใช้งานมีจำกัด

ตารางที่ 2.3 สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ [15] (ต่อ)

สารเคมี	หน้าที่	ชนิดของเยื่อ	ข้อดี	ข้อเสีย
6. Chelant (EDTA or DTPA), Q	Remove metal ions	Chemical	มีประสิทธิภาพในการใช้งาน	ราคาแพง
7. Oxygen (O_2), O	Oxidize lignin Solubilize lignin	Chemical	ราคาถูก	reactor มีราคาแพง และทำให้ความแข็งแรงเยื่อลดลง
8. Ozone (O_3), Z	Oxidize lignin Brighten pulp	Chemical	มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน	ควบคุมยาก
9. Sodium hydroxide (NaOH), Y	Solubilize lignin	Chemical	ใช้งานง่าย ราคาถูก	ทำให้เยื่อเกิดสีดำ
10. Xylanase (enzyme), X	Catalyze xylan hydrolysis and aid delignification	Chemical	ใช้งานง่าย	ราคาแพงมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.8 กระบวนการผลิตกระดาษ (Papermaking)

กระดาษ คือ แผ่นที่เกิดจากการฟอร์มตัวของเส้นใยและองค์ประกอบที่ไม่ใช้เส้นใยที่อยู่รวมกันเป็นสารแขวนลอยผ่านแผ่นสกรีน และเส้นใยเหล่านี้อยู่รวมกันเป็นแผ่นด้วยพันธะเคมีแบบพันธะไฮโดรเจน (H-bond) [2]

2.1.8.1 องค์ประกอบภายในกระดาษ

ในกระบวนการผลิตกระดาษจะแบ่งองค์ประกอบภายในกระดาษเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibers) และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (Non-fibrous materials)

- **ส่วนที่เป็นเส้นใย** คือ เยื่อชนิดต่างๆ เช่น เยื่อจากไม้เนื้ออ่อนซึ่งเป็นเยื่อใยยาว เยื่อจากไม้เนื้อแข็งซึ่งเป็นเยื่อใยสั้น เยื่อจากพืชล้มลุก เยื่อจากส่วนอื่นๆ ของพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ และเยื่อรีไซเคิล

- **ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย** ส่วนมากจะเป็นกลุ่มของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ สารเคมีเหล่านี้จะเติมลงไปในกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- สารช่วยการกักเก็บ (Retention aids) จะช่วยเพิ่มการกักเก็บของเส้นใยและส่วนที่ไม่ใช่เส้นใยไว้ในกระดาษในระหว่างที่เกิดการฟอร์มตัวเป็นแผ่น สารเคมีเหล่านี้ได้แก่ พอลิเอมีน (Polyamines) พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) แป้งดัดแปรที่ปรับให้เป็นประจุบวก (Cationic starch) เป็นต้น

- สารกันซึม (Sizing agents) คือ สารเคมีที่ใส่เข้าไปเพื่อชะลอการซึมของน้ำ ทำให้กระดาษต้านทานการเปียกน้ำได้ดีขึ้น สารเคมีประเภทนี้ได้แก่ โรซิน (Rosin) อัคคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) อัลคีนิลซักซินิกแอนไฮดรายด์ (Alkenyl Succinic Anhydride, ASA) เป็นต้น

- สารเติมเติมหรือตัวเติม (Fillers) จะใส่ลงไปเพื่อเพิ่มและปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ดีขึ้น เช่น ความเรียบ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความมันวาว การรองรับหมึกพิมพ์ คุณภาพงานพิมพ์ เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิตกระดาษ เนื่องจากเยื่อมีราคาแพงกว่าสารเติมแต่งมาก สารจำพวกนี้ได้แก่ ดินขาว (Kaolin clay) ซิลิกา (Silica) อะลัม (Alum) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, $CaCO_3$) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นต้น

- สารเพิ่มความแข็งแรงในขณะแห้ง (Dry strength agents) เป็นสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ สารจำพวกนี้ได้แก่ แป้ง (Starch) พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide, PAM) เป็นต้น

- สารเพิ่มความแข็งแรงในขณะเปียก (Wet strength agents) เป็นสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษในสภาวะเปียก เช่น กระดาษชำระ สารจำพวกนี้ได้แก่ ยูเอฟเรซิน (UF resin) เอ็มเอฟเรซิน (MF resin) เป็นต้น

- สีย้อม (Dyes) เป็นสารที่เติมลงในกระดาษเพื่อรักษาระดับเฉดสีของกระดาษให้คงที่ ช่วยเพิ่มความขาวสว่างของกระดาษให้มากขึ้น โดยปกติจะเติมลงในน้ำเยื่อก่อนการผลิตกระดาษ สารเคมีในกลุ่มนี้เช่น สีย้อมประเภทเรืองแสง (Fluorescent dye) เป็นต้น

- สารช่วยกระจายตัว (Formation aids) เป็นสารที่ช่วยลดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย ทำให้การฟอร์มตัวเป็นแผ่นของเส้นใยดีขึ้น สารในกลุ่มนี้ได้แก่ พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) กัม (Gums) เป็นต้น

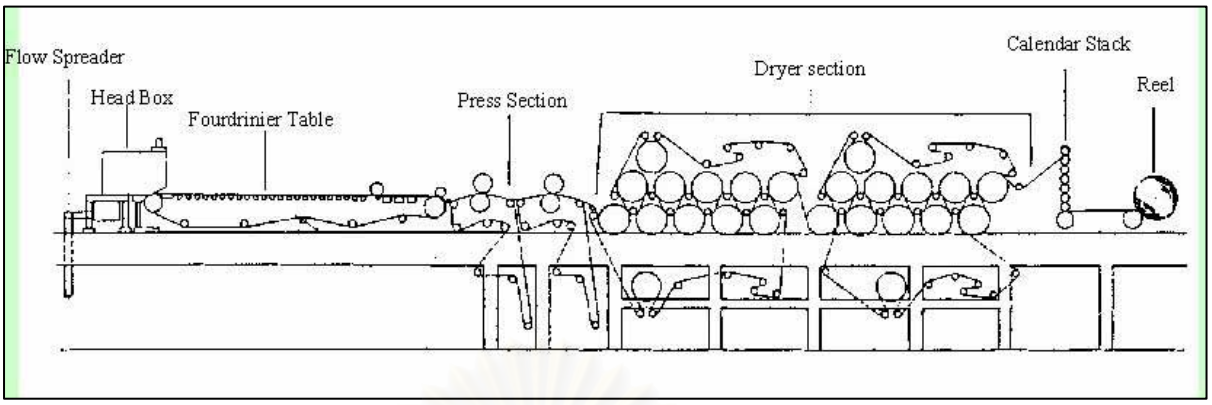
- สารควบคุมจุลชีพ (Micro-organism control agents) เป็นสารช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของจุลชีพ ช่วยป้องกันปัญหากระดาษมีกลิ่น กระดาษเกิดรอยด่าง และกระดาษขาดขณะทำการผลิต เป็นต้น

- สารควบคุมฟองอากาศ (Foam control agents) เป็นสารเคมีที่ใช้ในการป้องกันไม้ให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งการเกิดฟองอากาศจะทำให้กระดาษขาดหรือต้องลดความเร็วของเครื่องผลิตกระดาษลง สารเคมีจำพวกนี้ส่วนมากจะอยู่ในรูปของของเหลว

- สารช่วยเพิ่มสภาพระบายได้ (Drainage aids) เป็นสารช่วยทำให้สภาพระบายได้ของเยื่อในเครื่องทำกระดาษทำได้ง่ายขึ้น [2, 16]

2.1.8.2 **ขั้นตอนการผลิตกระดาษ**

การผลิตกระดาษเริ่มจากการไหลของน้ำเยื่อจากส่วนเตรียมน้ำเยื่อ (Stock preparation) เข้าสู่ Headbox จากนั้นน้ำเยื่อจะไหลลงสู่ตะแกรงในส่วนขึ้นแผ่นแล้วผ่านไปยังส่วนกดรีดน้ำ (Press section) โดยใช้สักหลาด (Felt) และทำแห้ง (Dryer section) ตามลำดับ โดยความชื้นสุดท้ายของกระดาษควรมีค่าประมาณร้อยละ 5 จากนั้นกระดาษที่แห้งแล้วจะถูกกรอเข้าม้วน (Reel) ก่อนการกรอเข้าม้วนอาจมีขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติกระดาษ เช่น การเคลือบผิว (Coating) หรือการขัดผิว (Calendering) เป็นต้น [17] ภาพที่ 2.9 แสดงเครื่องผลิตกระดาษแบบ Fourdrinier



ภาพที่ 2.9 เครื่องผลิตกระดาษแบบ Fourdrinier [18]

2.1.8.3 **การแปรรูปกระดาษ**

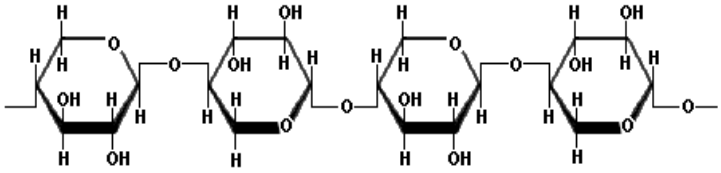
การแปรรูปกระดาษแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การแปรรูปเป็นกระดาษม้วนและการแปรรูปเป็นกระดาษแผ่น

- **การแปรรูปเป็นกระดาษม้วน** จะนำม้วน Jumbo Roll ขึ้นเครื่องไส (Slitter) เพื่อกรอเป็นม้วนกระดาษใหม่ ให้ได้หน้ากว้างและเส้นผ่าศูนย์กลางตามขนาดและตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้งาน

- **การแปรรูปเป็นกระดาษแผ่น** จะนำม้วน Jumbo Roll ขึ้นเครื่องตัด (Cutter) เพื่อตัดกระดาษให้เป็นแผ่น ตามขนาดและตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้งาน

2.1.9 **ไซแลน** (Xylan)

ไซแลนเป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ซึ่งพบในผนังเซลล์ของพืชประมาณร้อยละ 20-30 ไซแลนเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลดีไซโลส (D-Xylose) ที่เชื่อมต่อด้วยพันธะβ-1,4 xylosidic เป็นสายหลักและมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นหรือโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) สายสั้นๆ มาเชื่อมต่อเป็นสายกิ่ง [10] ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของไซแลน

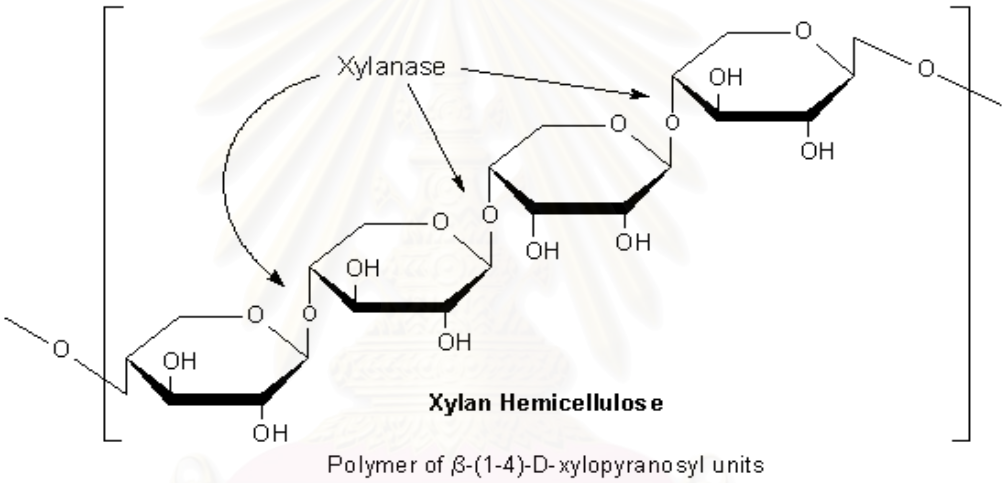


ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของไซแลน [19]

การย่อยสลายไซแลนให้เป็นไซโลส สามารถย่อยได้โดยการใช้สารเคมี (Chemical hydrolysis) หรือย่อยได้โดยการใช้เอนไซม์ในการย่อยสลาย ซึ่งการย่อยด้วยเอนไซม์จะได้ปฏิกิริยาที่จำเพาะเจาะจงกับตัวตั้งต้นมากกว่าการใช้เคมีในการย่อยสลาย

2.1.9.1 **เอนไซม์ไซแลนเนส** (Xylanase enzyme)

เอนไซม์ไซแลนเนสเป็นเอนไซม์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายไซแลน (ภาพที่ 2.11) ซึ่งการย่อยสลายไซแลนให้สมบูรณ์ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของเอนไซม์หลายชนิด เนื่องจากไซแลนมีโครงสร้างที่แตกต่างกันมาก รวมทั้งสายโซ่หลักมักจะมีกิ่งก้านแยกออกไปอีกหลายประเภท ดังนั้นจึงต้องอาศัยการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดร่วมกัน



ภาพที่ 2.11 การย่อยของเอนไซม์ไซแลนเนส [20]

ตัวอย่างของเอนไซม์ในกลุ่มเอนไซม์ไซแลนเนส เช่น เอนโดไซแลนเนส (Endoxylanase) เบต้า-ไซโลซิเดส (β-xylosidase) แอลฟา- แอล- อะราบิโนซิเดส (α-L-araninosidase) แอลฟา-กลูคูโรโนสิเดส (α-glucuronosidase) และอะเซติล (ไซแลน) เอสเทอเรส (Acetyl (Xylan) esterase เป็นต้น

2.1.9.2 **เอนไซม์ไซแลนเนสกับการฟอกเยื่อกระดาษ**

การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อกระดาษเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้เป็นเพราะนอกจากเอนไซม์ไซแลนเนสจะเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อแล้วยังช่วยลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อเป็นประโยชน์ต่อสภาพแวดล้อม [14] นอกจากนี้เอนไซม์ไซแลนเนสยังสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

กลไกการทำงานของเอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อยังไม่สามารถสรุป ได้อย่างแน่นอน [15] แต่กลไกที่เป็นไปได้ มีดังนี้ คือ

- เนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลส มีการสร้างพันธะกันแบบพันธะโควาแลนท์ เกิดเป็นสารประกอบซ้อนระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต ที่เรียกว่า Lignin carbohydrate complex การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสจะไปตัดสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลน (น้ำตาลไซโลส) ออก ทำให้สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ง่ายมากขึ้น

- สำหรับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ (Kraft pulp) ในระหว่างการต้มเยื่อนั้น เฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลนจะหลุดออกมา แต่สุดท้ายก็จะกลับไปเคลือบที่ผิวของเส้นใยขนาดเล็กๆ ดังนั้นการใช้ไซแลนเนสก่อนการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ จะไปช่วยจัดการกับไซแลนที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเส้นใยก่อน ทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีกับลิกนินเกิดได้ง่ายขึ้น

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jahan และคณะ [21] ศึกษาการเตรียมเยื่อและสมบัติกระดาษจากเยื่อ Pati ซึ่งเป็นต้นหญ้าชนิดหนึ่งที่พบในประเทศบังกลาเทศ โดยได้นำต้น Pati จากแหล่งที่แตกต่างกัน 2 แหล่ง มาทำการเตรียมเยื่อและผลิตกระดาษ แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของต้น Pati ทั้ง 2 แหล่งแตกต่างกัน แต่ Pati จากทั้ง 2 แหล่งสามารถนำมาผลิตกระดาษได้เหมือนกัน โดยมีสมบัติทางด้านกายภาพแตกต่างกันเล็กน้อย

Manji [22] ศึกษาการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการฟอกเยื่อใยยาว และเพื่อลดการใช้คลอรีนและคลอรีนไดออกไซด์ในกระบวนการฟอกเยื่อ จากการทดลองจะพบว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสช่วยลดปริมาณการใช้คลอรีนลง นอกจากนี้การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสยังไม่มีผลต่อการสูญเสียผลผลิตเยื่อและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเยื่อ

Prasad และคณะ [23] ศึกษาการใช้เอนไซม์เพื่อปรับปรุงความสามารถในการฟอกเยื่อเชิงกลจากชานอ้อย โดยมีการใช้เอมไซม์ในการฟอกเยื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ใช้เอนไซม์ จากผลการทดลองพบว่าค่าความขาวสว่างของเยื่อที่มีการใช้เอนไซม์จะมีค่าสูงกว่าเยื่อที่ไม่ใช้เอนไซม์ ส่วนสมบัติด้านความแข็งแรงของเยื่อที่มีการใช้เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

Zhao และคณะ [24] ศึกษาการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสก่อนการผลิตเยื่อกระดาษฟางข้าวในกระบวนการโซดา โดยมีการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสก่อนการต้มเยื่อและก่อนการฟอกเยื่อ แล้วจึงนำเส้นใยที่ได้ไปขึ้นแผ่นกระดาษเพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ จากผลการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสทำให้ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (Kappa number) ลดลง ในส่วนสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางกายภาพ พบว่า เยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์มีค่าความขาวสว่างสูงกว่า รวมทั้งมีค่าความต้านทานต่อแรงฉีกสูงกว่า แต่ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานต่อแรงดันทะลุต่ำกว่าเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์

Bajpai และคณะ [25] ศึกษาการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อกระดาษที่ผลิตจากต้นไผ่ โดยมีการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในระดับต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า Bleachzyme F และ Irgazyme 40S ช่วยลดการใช้คลอรีน (Cl_2) ในขั้นตอนแรกของกระบวนการฟอกเยื่อได้ถึง 20% และช่วยเพิ่มค่าความขาวสว่างได้ถึง 89% โดยการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสไม่มีผลกระทบต่อความหนืดของเยื่อและสมบัติด้านความแข็งแรงของเยื่อ

Daneault และคณะ [26] ศึกษาการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อกระดาษที่ผลิตด้วยกระบวนการคราฟต์ จากผลการทดลองพบว่าการฟอกเยื่อแบบชีวภาพมีประโยชน์ในด้านการลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ ลดต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ ลดการเกิดสารประกอบพวกอินทรีย์ชนิดฮาโลเจน (Adsorbable Organic halogens, AOX และทำให้เยื่อมีความขาวสว่างสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. หญ้าคา (Cogon grass) จากศูนย์วิจัยพันธุ์พืชจังหวัดเชียงราย

2. หญ้าแฝก (Vetiver grass) จากศูนย์วิจัยพันธุ์พืชจังหวัดเชียงราย

3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท Merck KGaA, Germany

4. เอนไซม์ไซแลนเนส (Xylanase) ที่ผลิตจาก *Trichoderma reedsei* เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัทสยามวิตตอรี เคมีคอล จำกัด, ประเทศไทย

5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท Poch, Poland

6. โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท Merck KGaA, Germany

7. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท Merck KGaA, Germany

8. น้ำกลั่น

3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องต้มเยื่อ (Autoclave digester); Universal Engineering Corporation, India

2. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator); รุ่น T-292, Adirondack Machine Corporation, USA

3. เครื่องบดเยื่อ (Valley beater); รุ่น UEC-2018A, Universal Engineering Corporation, India

4. เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness tester); รุ่น LTDA, Regmed, Brazil

5. เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former); รุ่น Rapid-Köthen Blattbildner, PTI Laboratory Equipment, Austria

6. เครื่องวัดความเรียบของกระดาษ (Smoothness tester); รุ่น 0168, Toyosieki Seisaku, Japan

7. เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (Thickness tester) ; Frank, Germany

8. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst tester); บริษัท Lorentzen & Wettre, Sweden

9. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester); รุ่น Strograph E-S, Toyoseiki Seisaku-SHO LTD., Japan

10. เครื่องวัดความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear tester); รุ่น Protear, Thwing-Albert Instrument, USA

11. กระดาษกรองเบอร์ 4; Whatman International Ltd., England

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

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

14. เครื่องวัดความชื้น (Moistrure Determination Balance); รุ่น KettFD-600, Kett Electric Laboratory, USA

15. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter); Denver Instrument, Germany

16. ตู้อบ (Oven) ; Venticell, Germany

17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM); รุ่น JEOL JSM-5410LV, USA

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

19. เครื่องวัดความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษ; รุ่น Color Touch PC, Technidyne corporation, USA

20. เครื่องตัดกระดาษเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีก; รุ่น Saltaranpur, Germany

21. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath); รุ่น WB29 บริษัท Memmert, Germany

22. กระบอกตวง ขนาด 25, 100 และ 1000 มิลลิลิตร

23. บีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 250, 500 มิลลิลิตร

24. แท่งแก้วคนสาร

25. เทอร์โมมิเตอร์

26. ถุงพลาสติก

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากเส้นใยของหญ้าคาและหญ้าแฝก

3.2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

หญ้าคาและหญ้าแฝกที่เก็บเกี่ยวจากศูนย์วิจัยพันธุ์พืชจังหวัดเชียงราย นำมาเตรียมเพื่อใช้ในการผลิตเยื่อ โดยตัดต้นหญ้าคาและหญ้าแฝกให้มีขนาดความยาวประมาณ 2–3 เซนติเมตร จากนั้นนำไปตากให้แห้งประมาณ 2 อาทิตย์หรือจนกว่าน้ำหนักหญ้าคงที่ ก่อนที่จะนำหญ้าทั้ง 2 ชนิดไปผลิตเป็นเยื่อและกระดาษ

3.2.1.2 การผลิตเยื่อ (Pulping)

- ผลิตเยื่อจากหญ้าทั้งสองชนิดด้วยวิธีการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เป็นสารต้มเยื่อ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้คือ 7.5%, 10%, 12.5% และ 15% ของน้ำหนักหญ้าแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อคือ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ภาพที่ 3.1)

ภาพที่ 3.1 เครื่องต้มเยื่อ (Autoclave digester)

- หลังการผลิตเยื่อเสร็จสิ้นนำเยื่อที่ได้มาล้างให้สะอาด จากนั้นนำเยื่อมาตีกระจายด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อเพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกันเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ แล้วจึงนำเยื่อมาบดด้วยเครื่องบดเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T200 sp-01 หยุดเครื่องเป็นระยะเพื่อนำน้ำเยื่อมาหาค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T227 om-99 และหยุดการบดเยื่อเมื่อได้ค่าสภาพระบายได้ที่เหมาะสมที่ประมาณ 350-400 มิลลิลิตร

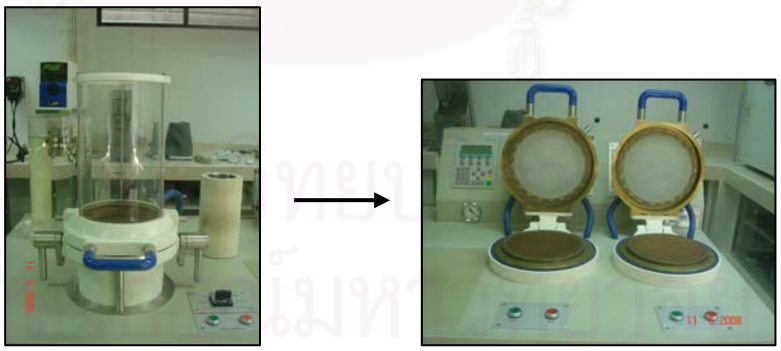
- นำเยื่อมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ เช่น ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ความยาวและความกว้างของเส้นใย (Fiber length and width) ผลผลิตของเยื่อ (Yield) และองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ เป็นต้น

3.2.1.3 การขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet forming)

- นำเยื่อที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen (Rapid-Köthen Sheet former) ให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร โดยตัวเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน (ภาพที่ 3.2) คือ ส่วนขึ้นแผ่นกระดาษและส่วนอบแห้ง

- วิธีการขึ้นแผ่นกระดาษ ทำได้ดังนี้

เทน้ำเยื่อลงในส่วนที่ทำให้น้ำเยื่อเกิดการจัดเรียงตัวกลายเป็นแผ่นกระดาษ โดยเครื่องจะทำการกระจายเยื่อเพื่อให้เยื่ออยู่กระจายทั่วแผ่นเท่าๆกัน จากนั้นจะมีการระบายน้ำออกโดยอาศัยแรงสุญญากาศ ซึ่งแผ่นกระดาษที่ได้ออกมาจะมีลักษณะเป็นแผ่นกระดาษวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร นำกระดาษที่ใช้สำหรับการทำแผ่นกระดาษมาประกบแผ่นกระดาษที่ใช้สำหรับการทำแผ่นกระดาษที่ได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แล้วใช้ลูกกลิ้งกดรีดเอาน้ำออก จากนั้นนำกระดาษที่ผ่านการกดรีดเอาน้ำออกแล้วมาอบแห้ง ในส่วนอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที



ภาพที่ 3.2 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen (Rapid-Köthen Sheet former)

3.2.1.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นกระดาษ

นำแผ่นกระดาษที่ได้หลังจากการขึ้นแผ่นจากข้อ 3.2.1.3 ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน โดยแบ่งกระดาษออกเป็น 3 ส่วน เพื่อทดสอบสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของกระดาษ ดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางโครงสร้าง (Structural properties)

- น้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight) ทดสอบโดยการนำกระดาษไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำน้ำหนักที่หาได้ของกระดาษแผ่นนั้นๆ ไปหารด้วยพื้นที่ของกระดาษ เพื่อให้ได้น้ำหนักมาตรฐาน

- ความเรียบ (Smoothness, Bekk method) ตามมาตรฐาน TAPPI T479 เป็นการทดสอบเพื่อหาความเรียบของกระดาษ โดยเครื่องทดสอบความเรียบ (Smoothness tester) ซึ่งเป็นการวัดเวลาที่อากาศใช้ในการไหลผ่านกระดาษ จากนั้นบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่อง

- ความหนา (Thickness) เป็นการทดสอบเพื่อหาความหนาของกระดาษ โดยเครื่องทดสอบความหนา (Thickness tester) จากนั้นนำค่าน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษแต่ละแผ่นหารด้วยความหนาที่วัดได้ของกระดาษแผ่นนั้นๆ เพื่อหาความหนาแน่นของกระดาษ

2. สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

ในการทดสอบจะตัดกระดาษให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน TAPPI T220 sp-01 เพื่อนำไปทดสอบสมบัติ ดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T494 om-01 เป็นการทดสอบแรงดึงที่กระทำต่อกระดาษที่มากที่สุดจนทำให้กระดาษขาดได้ จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) คือ นำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษแต่ละแผ่นหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษแผ่นนั้นๆ เพื่อเป็นการลดปัจจัยด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

- ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T403 om-97 เป็นการทดสอบแรงที่ต้องใช้ในการดันกระดาษจากด้านหนึ่งไปทะลุยังอีกด้านหนึ่ง จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst Index) คือ นำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษแต่ละแผ่นหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

ของกระดาษแผ่นนั้นๆ เพื่อเป็นการลดปัจจัยด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

- ความต้านทานแรงฉีก (Tear strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T414 om-98 เป็นการทดสอบแรงฉีกที่ต้องใช้ในการทำให้กระดาษขาดออกจากรอยตัดเริ่มต้นที่ทำไว้ จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาคำนวณหาค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear Index) คือ นำค่าความต้านทานต่อแรงฉีกของกระดาษแต่ละแผ่นหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษแผ่นนั้นๆ เพื่อเป็นการลดปัจจัยทางด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

3. สมบัติทางแสง (Optical properties)

- ความขาวสว่าง (Brightness) ตามมาตรฐาน TAPPI T452 om-92 เป็นการวัดความขาวสว่างของแผ่นกระดาษ โดยสามารถวัดจากค่าการสะท้อนแสงของแสงสีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร

- ความทึบแสง (Opacity) ตามมาตรฐาน TAPPI T519 สามารถวัดได้โดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงสีเขียวในช่วงความยาวคลื่น 557 นาโนเมตร

3.2.1.5 การวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.1.4 มาทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเยื่อจากหญ้าคาและหญ้าแฝก เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก โดยนำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งในแต่ละการทดสอบสมบัติของกระดาษจะทำการทดสอบโดยใช้แผ่นกระดาษจำนวน 5 แผ่น และในแต่ละภาวะการฟอกเยื่อนั้นจะทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: ศึกษาผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

3.2.2.1 การเตรียมเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

- ผลิตเยื่อโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.2.1.2

3.2.2.2 การเตรียมสารเคมี

- เตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ 5% และ 10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (o.d weight)

- เตรียมโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ความเข้มข้น 2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (o.d weight)

- เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.2.2.3 การฟอกเยื่อกระดาษ

- แบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ทำการฟอกและส่วนที่ทำการฟอก

- โดยในส่วนที่ทำการฟอกจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 10.0±0.2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 10.0 ±0.2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และส่วนที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 10.0 ±0.2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแต่ละส่วนจะใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 ระดับ คือ 5% และ 10% ดังภาพที่ 3.3

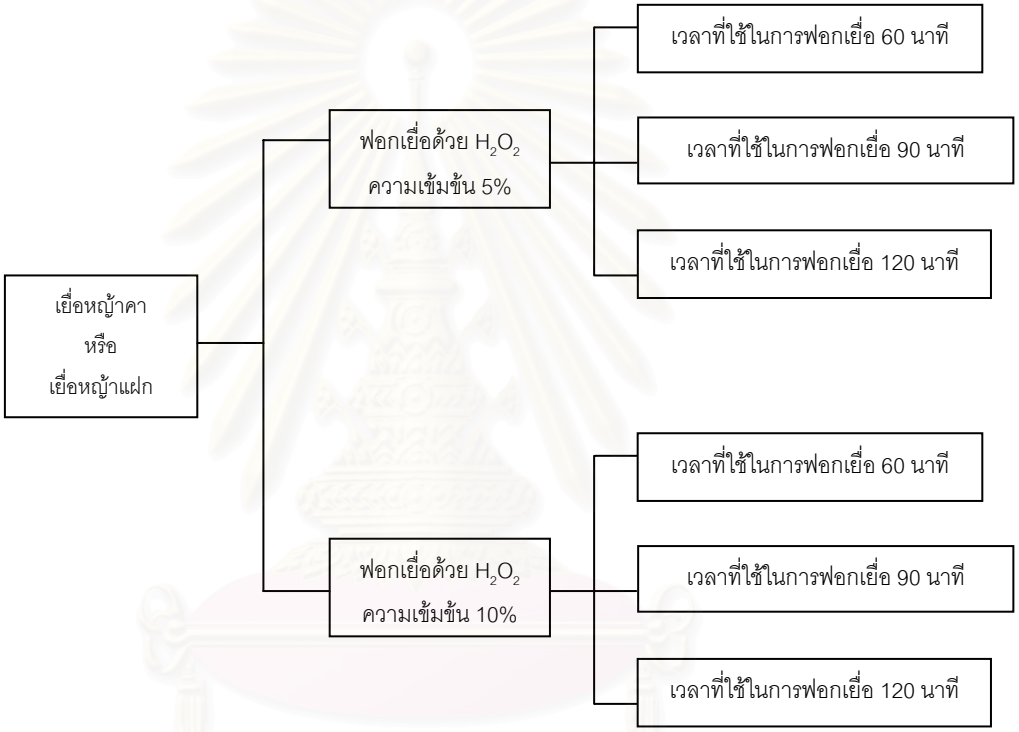
- นำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมซิลิเกตที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.2.2 มาทำการผสมให้เข้ากันแล้วเทลงเยื่อเปียกที่มีร้อยละความเข้มข้น (%Consistency) ที่ 25 จากนั้นผสมสารเคมีให้เข้ากับเยื่อแล้วนำไปวัดค่า pH เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.2.2 เพื่อปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 10.0 ±0.2

- นำเยื่อที่พร้อมทำการฟอกมาใส่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และฟอกตามเวลาที่กำหนด (ภาพที่ 3.3) โดยทุก 5 นาที จะทำการบีบนวดเพื่อให้ประสิทธิภาพของการฟอกเยื่อดีขึ้น

- เมื่อฟอกเยื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเยื่อที่ได้ไปล้างน้ำให้สะอาดแล้วนำไปทำการขึ้นแผ่นกระดาษตามวิธีจากข้อ 3.2.1.3 และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นกระดาษตามวิธีจากข้อ 3.2.1.4

3.2.2.4 การวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.2.3 มาทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ โดยนำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งในแต่ละการทดสอบสมบัติของกระดาษจะทำการทดสอบโดยใช้แผ่นกระดาษจำนวน 5 แผ่น



ภาพที่ 3.3 แผนผังแสดงการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: ศึกษาผลของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

3.2.3.1 การเตรียมเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

- ผลิตเยื่อโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.2.1.2

3.2.3.2 การเตรียมเอนไซม์ไซแลนเนส

- เตรียมเอนไซม์ไซแลนเนสที่ผลิตจาก *Trichoderma reesei* โดยแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 6.2 IU, 18.6 IU, และ 31 IU ต่อกรัมน้ำหนักเยื่อแห้ง (IU/g)

3.2.3.3 เตรียมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

- เตรียมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 5% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.2.3.4 การฟอกเยื่อกระดาษ

- แบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ทำการฟอกและส่วนที่ทำการฟอก

- โดยในส่วนที่ทำการฟอกจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับ 6.2 IU/g, 18.6 IU/g และ 31 IU/g (ภาพที่ 3.4)

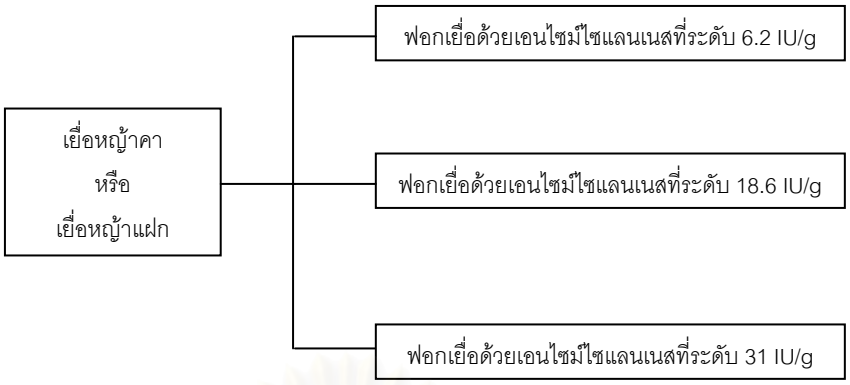
- นำเอนไซม์ไซแลนเนสที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.3.2 ใส่ลงไปในเยื่อเปียกที่มีร้อยละความเข้มข้น (% Consistency) ที่ 25 จากนั้นบีบนวดเพื่อให้เอนไซม์ไซแลนเนสผสมกับเยื่อแล้วนำไปวัดค่า pH และเติมกรดซัลฟิวริก เพื่อปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 5.5 ±0.2

- นำเยื่อที่พร้อมทำการฟอกมาใส่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทุก 5 นาที จะทำการบีบนวดเพื่อให้เอนไซม์ทำงานได้ดีขึ้น

- เมื่อฟอกเยื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเยื่อที่ได้ไปล้างน้ำให้สะอาดแล้วนำไปทำการขึ้นแผ่นกระดาษตามวิธีจากข้อ 3.2.1.3 และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นกระดาษตามวิธีจากข้อ 3.2.1.4

3.2.3.4 การวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.3.3 มาทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผ่านการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่างๆ โดยนำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งในแต่ละการทดสอบสมบัติของกระดาษ จะทำการทดสอบโดยใช้แผ่นกระดาษจำนวน 5 แผ่น



ภาพที่ 3.4 แผนผังแสดงการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

3.2.4 การทดลองตอนที่ 4: ศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

3.2.4.1 การเตรียมเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

- ผลิตเยื่อโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.2.1.2

3.2.4.2 การเตรียมสารเคมี

- เตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ตามวิธีการเตรียมสารเคมีจากข้อ 3.2.2.2 และเตรียมกรดซัลฟิวริก ตามข้อ 3.2.3.3

3.2.4.3 การเตรียมเอนไซม์ไซแลนเนส

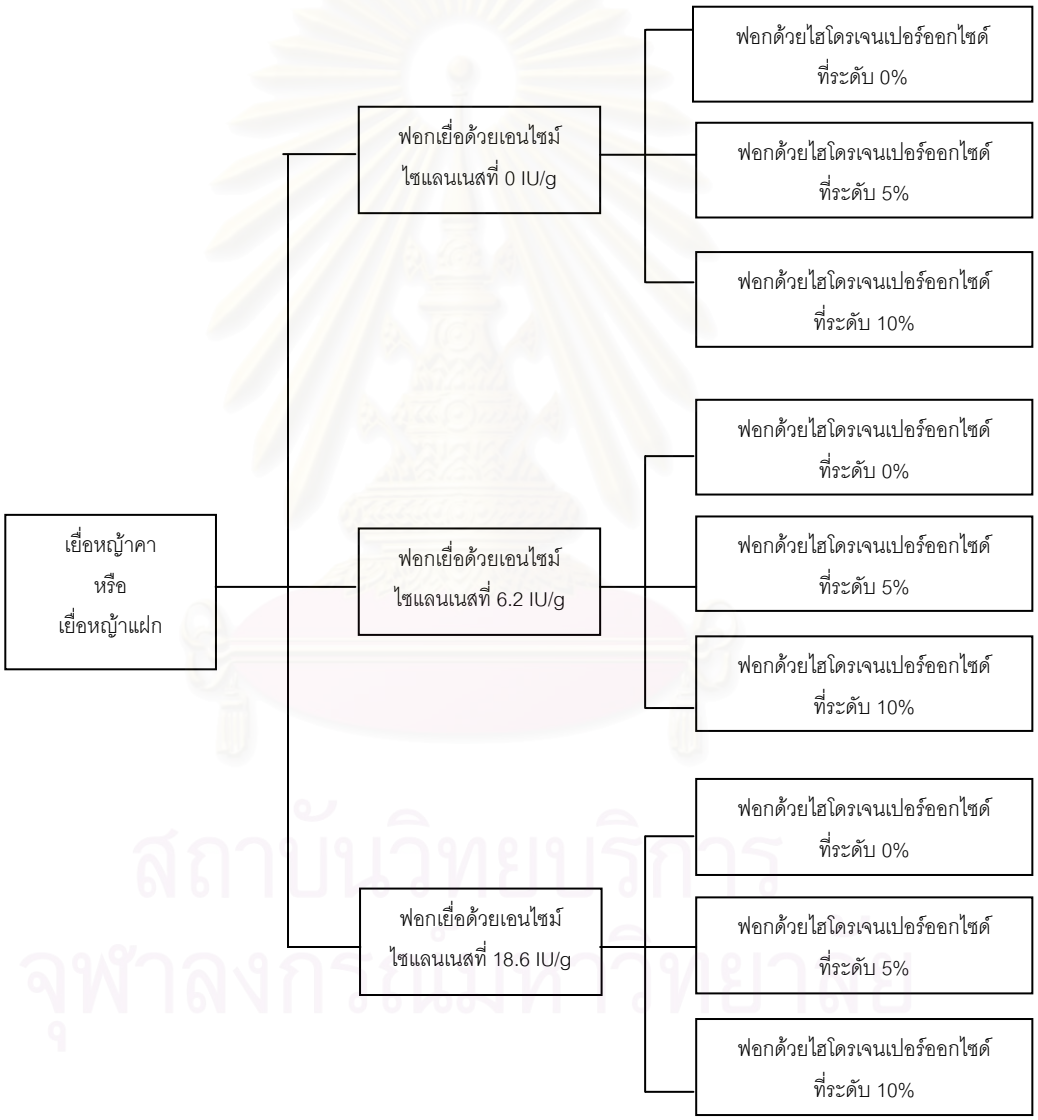
- เตรียมเอนไซม์ไซแลนเนสที่ผลิตจาก *Trichoderma reesei* โดยแบ่งเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 6.2 IU และ 18.6 IU ต่อกรัมน้ำหนักเยื่อแห้ง (IU/g)

3.2.4.3 การฟอกเยื่อกระดาษ

- ทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสแล้วทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยในการทดลองในส่วนของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสนั้น แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 0 IU/g (ไม่ผ่านการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส), 6.2 IU/g และ 18.6 IU/g ในส่วน

ของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้น แบ่งออกเป็น 3 ระดับ เช่นเดียวกัน คือ ร้อยละ 0 (ไม่ผ่านการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์) ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ทำให้มีภาวการณ์ทดลองเกิดขึ้น 9 ภาวะ การทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.5

- นำเอนไซม์ไซแลนเนสที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.4.3 ใส่ลงไปในเยื่อเปียกที่มีร้อยละความเข้มข้น (%Consistency) ที่ 25 จากนั้นบีบนวดเพื่อให้เอนไซม์ไซแลนเนสผสมกับเยื่อแล้วนำไปวัดค่า pH เติมกรดซัลฟิวริก เพื่อปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 5.5 ±0.2



ภาพที่ 3.5 แผนผังแสดงการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

- นำเยื่อที่พร้อมทำการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสมาใส่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทุก 5 นาที จะทำการบีบนวดเพื่อให้เอนไซม์ทำงานได้ดีขึ้น จากนั้นทำการฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทุก 5 นาที จะทำการบีบนวดเพื่อให้การฟอกเยื่อมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

- เมื่อฟอกเยื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเยื่อที่ได้ไปล้างน้ำให้สะอาดแล้วไปทำการขึ้นแผ่นกระดาษตามวิธีจากข้อ 3.2.1.3 และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นกระดาษตามวิธีจากข้อ 3.2.1.4

3.2.4.4 การวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.4.4 มาทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผ่านการฟอกด้วยเอนไซม์รวมกับการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ โดยนำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งในแต่ละการทดสอบสมบัติของกระดาษ จะทำการทดสอบโดยใช้แผ่นกระดาษจำนวน 5 แผ่น และในแต่ละภาวะการฟอกเยื่อนั้นจะทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้จากทุกขั้นตอนการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้ One – factor analysis of variance (One-way ANOVA) รวมถึง Two- factor analysis of variance เพื่อวิเคราะห์หาค่า P-value และคำนวณหาค่า F ทางสถิติ โดยจะมีการยอมรับว่าตัวแปรในการศึกษานั้นๆ มีผลต่อสมบัติของกระดาษก็ต่อเมื่อค่า P-value มีค่าน้องกว่า 0.05 (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) และค่า F จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่า F จากตาราง เมื่อใช้ค่า α เท่ากับ 0.05 นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ผลทางสถิติ SPSS โดยการวิเคราะห์ผลจะวิเคราะห์ผลทางสถิติแบบการวิเคราะห์การทดลองปัจจัยเดียวแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) การเปรียบเทียบคู่ค่าเฉลี่ยแบบวิธีความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด (Last Significant Difference, LSD) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan และเปรียบเทียบความแตกต่างของระหว่างกลุ่มการทดลองโดยวิธี One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งในการส่วนของการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม SPSS นั้นข้อมูลส่วนใหญ่จะอยู่ในภาคผนวก ค

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตเยื่อจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.1 นี้เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าคาและหญ้าแฝกก่อนและหลังการผลิตเยื่อ

จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกก่อนการผลิตเยื่อ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝก พบว่า ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยหญ้าคามีค่ามากกว่าหญ้าแฝก คือ 40.28% และ 36.46% เปรียบเทียบกับ 37.32% และ 31.38% ตามลำดับ แต่ปริมาณลิกนินของเส้นใยหญ้าคามีค่าน้อยกว่า หญ้าแฝก คือ 21.05% เปรียบเทียบกับ 26.33%

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยของหญ้าคาและหญ้าแฝกก่อนการผลิตเยื่อ

ชนิดวัชพืช	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (%)				
	โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
หญ้าคา	76.74	40.28	36.46	21.05	2.21
หญ้าแฝก	68.70	37.32	31.38	26.33	4.97

จากตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการผลิตเยื่อ พบว่า ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝกเปลี่ยนแปลงไปในทุกภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อ โดยภาวะการผลิตเยื่อที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15.0% จะมีปริมาณลิกนินเหลืออยู่ในเยื่อน้อยที่สุดทั้งเส้นใยของหญ้าคาและหญ้าแฝก โดยหญ้าคาจะมีปริมาณลิกนินเหลืออยู่ในเยื่อมากกว่าหญ้าแฝก คือ 6.71% เปรียบเทียบกับ 5.71% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ลิกนินละลายออกได้มากขึ้น ทำให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น แต่ใน

ขณะเดียวกันเฮมิเซลลูโลสกลับมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับลิกนินซึ่งอาจเนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสและเกิดการสลายตัวได้ง่ายกว่าเซลลูโลสอีกด้วย [17]

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยของหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการผลิตเยื่อ

ชนิดวัชพืช	ปริมาณ NaOH (%)	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (%)				
		โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
หญ้าคา	10.0%	87.76	61.02	26.74	10.52	1.72
	12.5%	90.67	70.49	20.18	8.05	1.28
	15.0%	90.79	71.91	18.88	6.71	2.5
หญ้าแฝก	10.0%	86.37	61.04	25.33	9.09	4.54
	12.5%	89.94	68.75	21.19	6.35	3.71
	15.0%	90.04	69.57	20.47	5.71	4.25

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย	A			B		
	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง
โฮโลเซลลูโลส	0.047688*	19.48179	18.51282	0.009634*	102.8013	19
แอลฟาเซลลูโลส	0.196170	3.651985	18.51282	0.013153*	75.02956	19
เฮมิเซลลูโลส	0.708004	0.186419	18.51282	0.051403	18.45406	19
ลิกนิน	0.021225*	45.61888	18.51282	0.008955*	111.6721	19
อื่นๆ	0.017484*	55.70081	18.51282	0.262206	2.8138	19

หมายเหตุ: A คือ ชนิดของหญ้า (หญ้าคา และหญ้าแฝก) และ B คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (10%, 12.5% และ 15% ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ตามลำดับ)

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ โดยในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อชนิดต่างๆ ขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อชนิดขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่า F ที่ได้จากตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

เนื่องจากการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้น เป็นการทำการทดลองครั้งเดียว ไม่มีการทำซ้ำ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร คือ ชนิดของหญ้าและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A*B) จึงไม่มี

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ (A) และ ชนิดของหญ้าที่ศึกษา (B) ที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย พบว่า ชนิดของหญ้าที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยต่อไปนี้ คือ โฮโลเซลลูโลส ลิกนิน และสารอื่นๆ ในขณะที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยต่อไปนี้ คือ โฮโลเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส และลิกนิน ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีค่า F คำนวณมากกว่าค่า F จากตาราง

4.1.2 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการผลิตเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 7.5% ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อสูงที่สุด คือ 75.57% และ 56.41% ตามลำดับ โดยปริมาณผลผลิตเยื่อลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะว่านอกจากลิกนินจะถูกทำลายแล้ว เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสก็ถูกทำลายด้วยด่างจึงทำให้เกิดการตัดส่วนปลายของสาย เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ซึ่งเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า Peeling reaction ทำให้สายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสสั้นลง จนเป็นผลทำให้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้ลดลง [2] นอกจากนี้ยังพบว่าหญ้าคาให้ปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้สูงกว่าหญ้าแฝกในทุกๆ ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (Yield) ที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ชนิดวัชพืช	ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้ (%)			
	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
หญ้าคา	75.57 ±7.8	73.40 ±7.1	71.73 ±6.3	69.75 ±6.0
หญ้าแฝก	56.41 ±7.8	53.02 ±6.4	51.51 ±4.8	48.79 ±2.7

4.1.3 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและเยื่อหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ทำให้ลิกนินถูกละลายออกมามากขึ้น [2] ดังนั้นเส้นใยจึงสามารถแยกออกจากกันเป็นอิสระมากขึ้น และยังมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ๆ (Fines) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเส้นใยเหล่านี้สามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเยื่อหญ้าคามีค่าสภาพระบายได้ที่สูงกว่าเยื่อหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อ

ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของเยื่อหญ้าคาและเยื่อหญ้าแฝก

ชนิดวัชพืช	ค่าสภาพระบายได้ (CSF, mL)			
	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
หญ้าคา	377 ±7.0	370 ±2.6	317 ±9.7	304 ±3.8
หญ้าแฝก	336 ±4.6	311 ±5.3	292 ±5.8	280 ±7.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4 ความยาวและความกว้างของเส้นใยของเยื่อหญ้าคาและเยื่อหญ้าแฝก

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น แนวโน้มความยาวและความกว้างของเส้นใยทั้งจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มลดลง และยังพบว่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ (Fines) ของทั้งหญ้าคาและหญ้าแฝกมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่เส้นใยจากหญ้าทั้ง 2 ชนิดนี้ถูกทำลายด้วยด่างมากขึ้น [16] นอกจากนี้ยัง

พบว่าเยื่อหญ้าคาในทุกๆ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าความยาวและความกว้างของเส้นใยน้อยกว่าเยื่อหญ้าแฝก ส่งผลทำให้มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ มากกว่าเส้นใยของหญ้าแฝกด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.6 ความยาวและความกว้างของเส้นใย (Fiber length and width) จากเยื่อหญ้าคาและเยื่อหญ้าแฝก

NaOH	ความยาวเส้นใย (mm)		ความกว้างเส้นใย (μm)		ปริมาณ fines (%)	
(%)	หญ้าคา	หญ้าแฝก	หญ้าคา	หญ้าแฝก	หญ้าคา	หญ้าแฝก
7.5	0.741	0.862	17.856	18.439	58.30	54.35
10.0	0.675	0.852	17.573	17.969	67.40	58.98
12.5	0.651	0.745	17.328	17.859	69.90	61.23
15.0	0.633	0.748	17.341	17.512	70.75	67.29

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อสมบัติของเยื่อ

สมบัติของเยื่อ	A			B			A* B		
	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง
- ปริมาณผลผลิต	0.000219*	40.39555	5.317655	0.523188	0.809823	4.066181	0.997569	0.013911	4.066181
- สภาพระบายได้	0.141523	2.660361	5.317655	0.240236	1.717844	4.066181	0.941536	0.12681	4.066181
- ความยาวของเส้นใย	0.019654*	20.88685	10.12796	0.038379*	11.3001	9.276628	-	-	-
- ความกว้างของเส้นใย	0.005629*	51.15403	10.12796	0.051573	9.06209	9.276628	-	-	-

หมายเหตุ: A คือ ชนิดของหญ้า (หญ้าคา และหญ้าแฝก) B คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (10%, 12.5% และ 15% ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ตามลำดับ) และ A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของหญ้าและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ โดยในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลสมบัติต่างๆ ของเยื่อนั้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อเทียบกับค่า F ที่ได้จากตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

เนื่องจากการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อปริมาณผลผลิตและสภาพระบายได้ เป็นการทำการทดลองที่มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้สามารถพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแประหว่างตัวแปร (A*B) ได้ ในขณะที่อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อความยาวและความกว้างของเส้นใยเป็นการทำการทดลองครั้งเดียว ไม่มีการทำซ้ำ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร คือ ชนิดของหญ้าและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A*B) จึงไม่มี

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A) จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อดังนี้ ปริมาณผลผลิต ความยาวและความกว้างของเส้นใย ในขณะที่ชนิดของหญ้า (B) จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความยาวของเส้นใยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีค่า F คำนวณมากกว่าค่า F จากตาราง

4.2 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.2 นี้เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากเส้นใยหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.2.1 ความหนาแน่นและความเรียบ

จากตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อในแต่ละความเข้มข้นไม่มีผลต่อความหนาแน่นของกระดาษทั้งหญ้าคาและหญ้าแฝก โดยทั่วไปความหนาแน่นของกระดาษควรมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้น เพราะลิกนินถูกกำจัดออกไปมากขึ้นทำให้เส้นใยแนบตัวและยุบตัวได้ดีขึ้น [2,17] อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ ผลที่ได้ไม่เป็นดังที่กล่าวอาจเป็นเพราะการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแม้นจะมีแนวโน้มทำให้ได้เส้นใยขนาดสั้นมากขึ้น (จากตารางที่ 4.6) หากแต่การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ยังมีผลทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดน้อยลง (จากตารางที่ 4.2) ซึ่งอาจส่งผลให้เส้นใยรับน้ำได้ไม่ดี การแนบตัวและยุบตัวของเส้นใยจึงไม่เกิดมากนัก ดังนั้น

ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าทั้งสองชนิดในการทดลองนี้จึงให้ผลที่ไม่ชัดเจน

ตารางที่ 4.8 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

NaOH (%)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	
	หญ้าคา	หญ้าแฝก
7.5	0.669 ±0.07	0.731 ±0.07
10.0	0.641 ±0.09	0.720 ±0.05
12.5	0.651 ±0.06	0.697 ±0.05
15.0	0.627 ±0.04	0.708 ±0.09

นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อที่สูงขึ้น มีแนวโน้มทำให้กระดาษมีความเรียบมากขึ้น (ตารางที่ 4.9) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดจำนวนเส้นใยขนาดเล็กๆ มากขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่เส้นใยเล็กๆ เหล่านั้นจะไปอุดช่องว่างและรูเล็กๆ ระหว่างเส้นใยภายในกระดาษ จึงทำให้กระดาษมีความเรียบเพิ่มขึ้น [2]

เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าแฝกมีความหนาแน่นสูงกว่าและมีความเรียบมากกว่ากระดาษที่ได้จากเยื่อหญ้าคา โดยเฉพาะเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ

ตารางที่ 4.9 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

NaOH (%)	ความเรียบ (Sec)	
	หญ้าคา	หญ้าแฝก
7.5	7.7 ±0.5	10.2 ±0.4
10.0	12.2 ±0.6	12.7 ±0.6
12.5	13.0 ±0.5	14.4 ±0.6
15.0	16.7 ±0.7	17.4 ±0.5

4.2.2 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.1 แสดงผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและเยื่อหญ้าแฝกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น ทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้มากขึ้น [17] ดังนั้นกระดาษจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

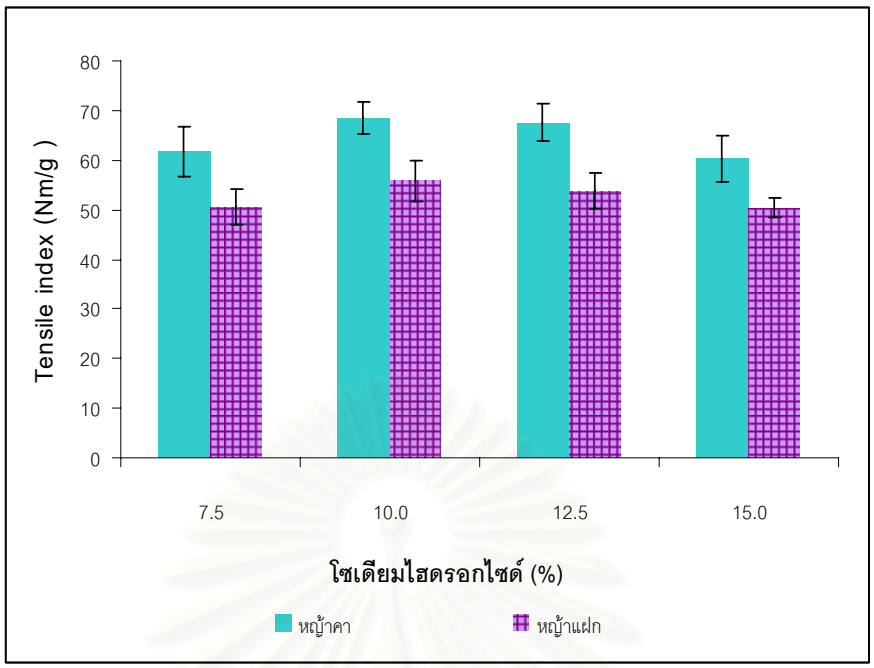
อย่างไรก็ตามความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษกลับมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป ทั้งนี้เนื่องจากการที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายด้วยด่าง ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยและความสามารถในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงลดลง ความแข็งแรงของกระดาษจึงมีแนวโน้มลดลงด้วย [2, 17]

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก พบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคามีแนวโน้มของความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ดีกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อ และภาวะของการผลิตเยื่อที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงดีที่สุดของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกคือ ภาวะที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10% รองลงมาคือ 12.5%, 7.5% และ 15% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจาก หญ้าคาและหญ้าแฝก

NaOH (%)	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index, Nm/g)	
	หญ้าคา	หญ้าแฝก
7.5	61.67 ±4.9	50.54 ±3.7
10.0	68.39 ±3.2	55.86 ±4.1
12.5	67.55 ±3.7	53.77 ±3.6
15.0	60.35 ±4.7	50.28 ±2.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.2.3 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.2 แสดงผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง ทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น ทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อมากจนเกินไปมีผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มที่ลดลง โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่ได้เป็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษดังแสดงในตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.1

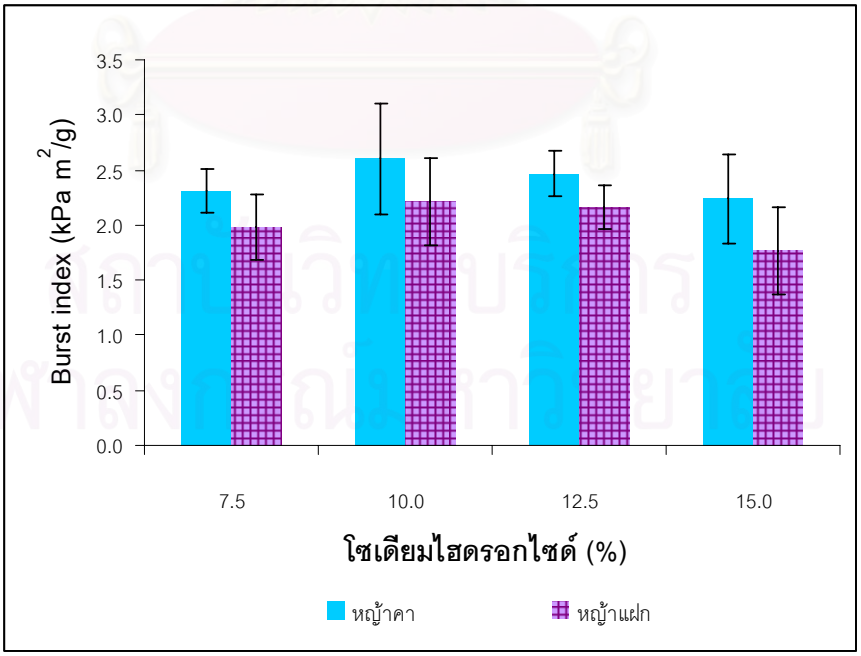
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าภาวะของการผลิตเยื่อที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากจนเกินไปจะส่งผลต่อเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส คือ ทำให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายได้มากขึ้นส่งผลทำให้สายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสั้นลง [2, 17] ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 4.6 ที่แสดงถึงความยาวและความกว้างของเส้นใย แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการใช้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้นทำให้ความยาวและความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มที่ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก พบว่า กระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากหญ้าแฝกในทุกความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ และปริมาณโซเดียมที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกสูงสุด คือ 10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง รองลงมาคือ 12.5%, 7.5% และ 15% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

NaOH (%)	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index, kPa m^2/g)	
	หญ้าคา	หญ้าแฝก
7.5	2.311 ±0.2	1.976 ±0.3
10.0	2.601 ±0.5	2.209 ±0.4
12.5	2.468 ±0.2	2.161 ±0.2
15.0	2.240 ±0.4	1.769 ±0.4



ภาพที่ 4.2 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.2.4 ความต้านทานแรงฉีก

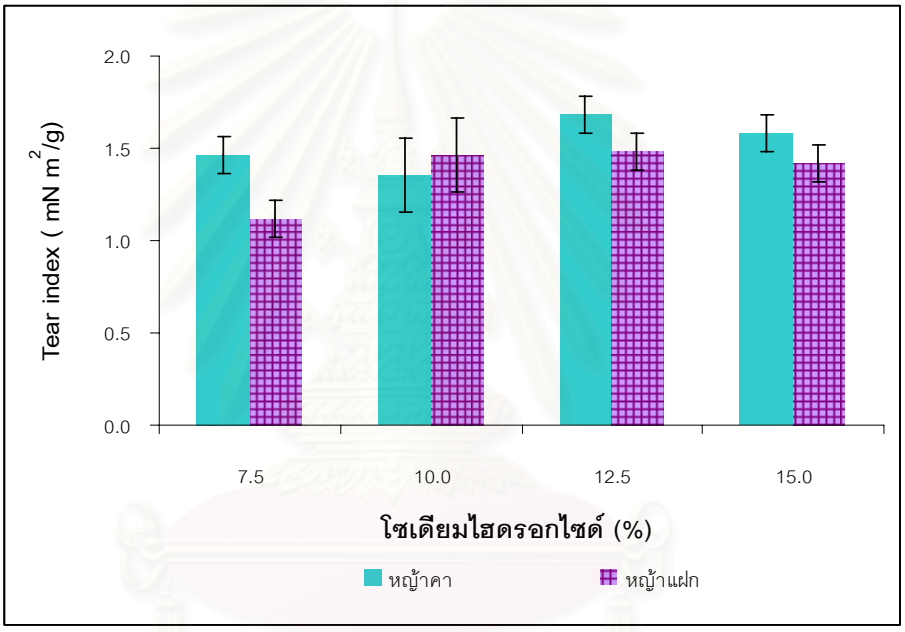
จากตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.3 แสดงผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนและเมื่อเปรียบเทียบกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกจะพบว่าความต้านทานแรงฉีกมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน คือ เยื่อหญ้าคาจะให้ความต้านทานแรงฉีกในภาวะการผลิตเยื่อด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 7.5% สูงกว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ 10% แต่ในทางกลับกันกระดาษจากเยื่อหญ้าแฝกกลับมีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงฉีกที่ภาวะการผลิตเยื่อด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10% มากกว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ 7.5% ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความแปรปรวนเป็นอย่างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยในกระดาษไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษ ซึ่งความต้านทานแรงฉีกอาจจะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยและความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ มากกว่าปริมาณพันธะระหว่างเส้นใย [17] และจากผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณเส้นใยสั้นๆ เกิดขึ้นมาก ซึ่งน่าจะมีแนวโน้มทำให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกลับพบว่าปริมาณแอลฟาเซลลูโลสกลับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น นั่นแสดงว่าเส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น น่าจะส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นได้ด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ผลที่ได้โดยภาพรวมจึงมีความไม่ชัดเจน

นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกสูงสุด คือ ที่ 10% ของน้ำหนักหญ้าแห้ง และในทุกความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ จะเห็นได้ว่า กระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากหญ้าแฝก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

NaOH (%)	ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear index, mN m^2/g)	
	หญ้าคา	หญ้าแฝก
7.5	1.463 ±0.1	1.114 ±0.1
10.0	1.356 ±0.2	1.460 ±0.2
12.5	1.685 ±0.1	1.486 ±0.1
15.0	1.578 ±0.1	1.420 ±0.1



ภาพที่ 4.3 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.2.5 ความขาวสว่างของกระดาษ

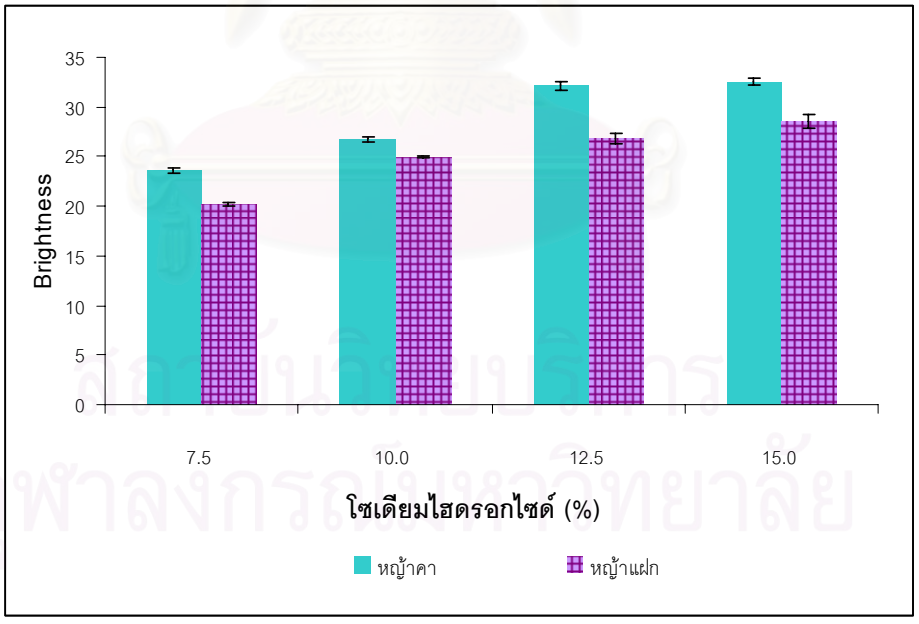
จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.4 แสดงผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การละลายตัวของลิกนินออกจากเส้นใยทำได้มากขึ้น

ลิกนินมีเหลืออยู่ในเส้นใยน้อยลง [2, 17] ดังนั้นกระดาษจึงมีความขาวสว่างมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ลิกนินที่เหลืออยู่ในเส้นใยมีปริมาณลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความขาวสว่างของกระดาษระหว่างเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกจะพบว่าความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาในทุกๆ ความเข้มข้นของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อมีค่าสูงกว่ากระดาษจากเยื่อหญ้าแฝกอีกด้วย

ตารางที่ 4.13 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ชนิดวัชพืช	ค่าความขาวสว่าง			
	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
หญ้าคา	23.61 ±0.2	26.74 ±0.3	32.13 ±0.4	32.56 ±0.3
หญ้าแฝก	20.17 ±0.2	24.92 ±0.1	26.84 ±0.5	28.53 ±0.7



ภาพที่ 4.4 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

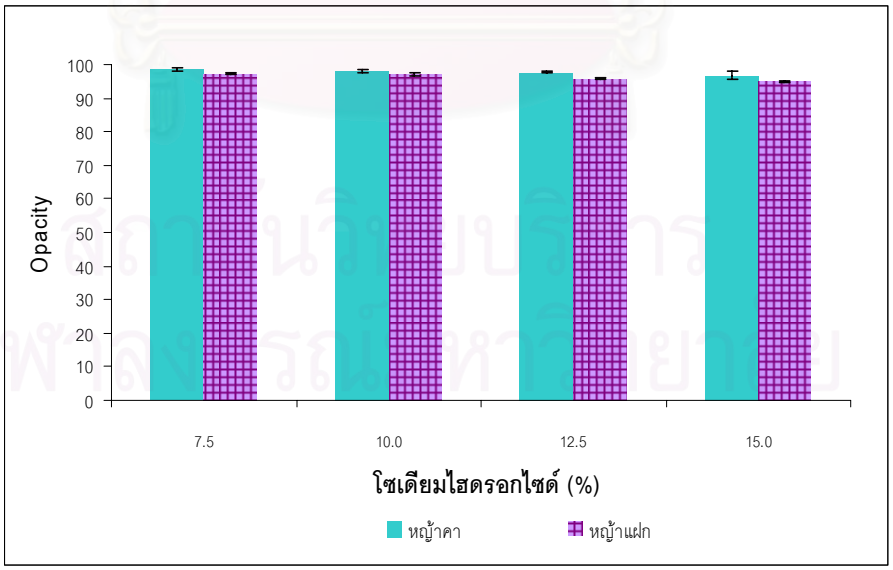
4.2.6 ความทึบแสงของกระดาษ

จากตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.5 แสดงผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มมากขึ้นโน้มแนวความทึบแสงของกระดาษมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากลิกนินถูกขจัดออกจากเส้นใยมากขึ้น การแนบชิดกันของเส้นใยดีขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างในการกระเจิงแสงลดลง ความทึบแสงของกระดาษจึงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความทึบแสงระหว่างกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก จะพบว่าความทึบแสงของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาในทุกๆ ความเข้มเข้มของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อมีค่าสูงกว่ากระดาษจากเยื่อหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.14 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ

ชนิดวัชพืช	ค่าความทึบแสง			
	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
หญ้าคา	98.64 ±0.5	98.00 ±0.5	97.75 ±0.4	96.65 ±1.2
หญ้าแฝก	97.33 ±0.3	97.23 ±0.5	95.83 ±0.2	95.01 ±0.2



ภาพที่ 4.5 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อสมบัติของกระดาษ

สมบัติของกระดาษ	A			B			A* B		
	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง
- ความหนาแน่น	0.023882*	7.734867	5.317655	0.771121	0.378672	4.066181	0.954967	0.104754	4.066181
- ความเรียบ	0.040005*	5.997174	5.317655	3.57E-05*	40.26135	4.066181	0.566039	0.721123	4.066181
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.0068*	13.09147	5.317655	0.428863	1.031694	4.066181	0.98492	0.048363	4.066181
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.020856*	8.232116	5.317655	0.237033	1.734694	4.066181	0.942663	0.125018	4.066181
- ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	0.170001	2.273884	5.317655	0.070286	3.481404	4.066181	0966036	0.085486	4.066181
- ความขาวสว่าง	0.014897*	25.6038	10.12796	0.009891*	29.68259	9.276628	-	-	-
- ความทึบแสง	0.010673*	32.56511	10.12796	0.025995*	15.01147	9.276628	-	-	-

หมายเหตุ: A คือ ชนิดของหญ้า (หญ้าคา และหญ้าแฝก) B คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (10%, 12.5% และ 15% ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ตามลำดับ) และ A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของหญ้าและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ โดยในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลสมบัติต่างๆ ของเยื่อนั้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อเทียบกับค่า F ที่ได้จากตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

เนื่องจากการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อความหนาแน่น ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และ ดัชนีความต้านทานแรงฉีก เป็นการทำการทดลองที่มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้สามารถพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแประหว่างตัวแปร (A*B) ได้ ในขณะที่อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของหญ้าที่มีต่อความขาวสว่างและความทึบแสงเป็นการทำการทดลองครั้งเดียว ไม่มีการทำซ้ำ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร คือ ชนิดของหญ้าและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A*B) จึงไม่มี

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A) จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษดังนี้ ความหนาแน่น ความเรียบ ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความขาวสว่างและความทึบแสง ในขณะที่ชนิดของหญ้า (B) จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความเรียบ ความขาวสว่างและความทึบแสงเท่านั้น

4.3 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.3 นี้ เป็นผลการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งศึกษาผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก โดยผลการทดลองที่ได้ มีดังนี้

4.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

จากตารางที่ 4.16 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของเส้นใยจากหญ้าคาและหญ้าแฝก พบว่า ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสของเส้นใยจากเยื่อหญ้าคาสูงกว่าเส้นใยจากเยื่อหญ้าแฝก แต่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและปริมาณลิกนินกลับมีค่าน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้พบว่า ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินมีแนวโน้มที่ไม่แตกต่างกันมากนักของทั้งเส้นใยจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

**หมายเหตุ เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อเท่ากับ 60 นาที

ชนิดวัชพืช	ปริมาณ H_2O_2 (%)	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (%)				
		โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
หญ้าคา	5.0	88.61	60.07	28.54	9.05	2.34
	10.0	89.11	60.49	28.62	8.73	2.16
หญ้าแฝก	5.0	86.17	56.88	29.29	10.62	3.21
	10.0	86.34	57.18	29.16	10.55	3.11

4.3.2 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

จากตารางที่ 4.17 แสดงปริมาณผลผลิตเยื่อของหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ได้หลังการฟอก จากตารางแสดงให้เห็นว่าการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกด้วยความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5% เป็นเวลา 60 นาที ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อสูงที่สุด คือ 83.13 % และ 81.85% ตามลำดับ โดยปริมาณผลผลิตเยื่อจะลดลงเล็กเมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นหรือใช้เวลาในการฟอกนานขึ้น และการฟอกเยื่อที่ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อต่ำที่สุดคือ การใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่10% เป็นเวลา 120 นาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายจากสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อหรือเวลาที่ใช้ในการฟอกนานจนเกินไป จนเป็นผลทำให้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้ลดลง [2]

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกจะพบว่า เยื่อหญ้าคาให้ผลผลิตเยื่อที่สูงกว่าเยื่อหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และทุกช่วงเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใยของหญ้าแฝกมีปริมาณน้อยกว่าในเส้นใยของหญ้าคา (ตารางที่ 4.16)

ตารางที่ 4.17 ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (Yield) ที่ได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	83.13 ±2.6	81.85 ±1.3
	90	80.97 ±3.7	75.10 ±3.4
	120	73.27 ±3.9	65.60 ±4.3
10.0	60	80.52 ±3.7	69.80 ±0.6
	90	78.21 ±4.5	64.14 ±0.9
	120	70.00 ±2.0	58.47 ±3.6

4.3.3 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและเยื่อหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อและมีการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นและการเพิ่มเวลาในการฟอกให้นานขึ้น อาจทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ (Fines) ถูกทำลายมากขึ้น หรือปริมาณเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายมากขึ้น ดังนั้นการอุ้มน้ำของทั้งเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกจึงน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าเยื่อหญ้าแฝกมีค่าสภาพระบายได้ที่สูงกว่าเยื่อหญ้าคาในทุกๆ ความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อและในทุกๆ ช่วงเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่ออีกด้วย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ (Fines) ของเยื่อจากหญ้าแฝกมีน้อยกว่าหญ้าคา ทำให้เยื่อจากหญ้าแฝกมีความสามารถในการอุ้มน้ำน้อยกว่าเยื่อหญ้าคา ส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้จึงสูงกว่าหญ้าคา

ตารางที่ 4.18 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่าสภาพระบายได้ (CSF,mL)	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	392 ±11.3	412 ±8.4
	90	400 ±2.8	439 ±2.8
	120	421 ±7.0	453 ±7.0
10.0	60	417 ±2.8	434 ±5.4
	90	425 ±11.3	468 ±12.6
	120	446 ±9.6	470 ±11.3

4.3.4 ความหนาแน่นและความเรียบของกระดาษ

จากตารางที่ 4.19 แสดงความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อและเวลาในการฟอกเยื่อมีผลต่อความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด คือ เมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือเพิ่มเวลาในการฟอกเยื่อจะทำให้ความหนาแน่นของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ลิกนินถูกกำจัดออกไปมากขึ้นทำให้เส้นใยสร้างพันธะต่อกันมากขึ้น [2,17] รวมถึงเส้นใยอาจมีความหยุ่นตัวมากขึ้น จึงทำให้ได้กระดาษที่มีความแน่นและความเรียบมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่า กระดาษจากเยื่อหญ้าแฝกมีความหนาแน่นมากกว่ากระดาษจากเยื่อหญ้าคาในทุกช่วงเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อและทุกความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

ตารางที่ 4.19 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	0.540 ±0.04	0.603 ±0.07
	90	0.544 ±0.01	0.627 ±0.18
	120	0.550 ±0.09	0.670 ±0.01
10.0	60	0.527 ±0.04	0.624 ±0.12
	90	0.542 ±0.02	0.648 ±0.05
	120	0.546 ±0.03	0.769 ±0.03

นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มเวลาและเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อยังมีผลทำให้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อของหญ้าทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มของความเรียบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.20) ทั้งนี้อาจเกิดจากการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สูงขึ้นและการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อที่นานขึ้นส่งผลทำให้เส้นใยของหญ้าคาและหญ้าแฝกสามารถสร้างพันธะต่อกันได้ดีขึ้น และเส้นใยมีความหยุ่นตัวดีขึ้น กระดาษจึงมีความหนาแน่นและความเรียบมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความเรียบของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่า กระดาษจากเยื่อหญ้าแฝกมีความเรียบมากกว่ากระดาษจากเยื่อหญ้าคาในทุกช่วงเวลาการฟอกเยื่อ และทุกความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ความเรียบ (Sec)	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	5.0 ±1.2	12.2 ±1.7
	90	5.6 ±1.4	16.7 ±0.9
	120	8.3 ±1.6	17.8 ±2.9
10.0	60	5.2 ±1.0	11.1 ±2.4
	90	5.8 ±1.7	16.9 ±2.1
	120	7.8 ±1.6	22.8 ±2.4

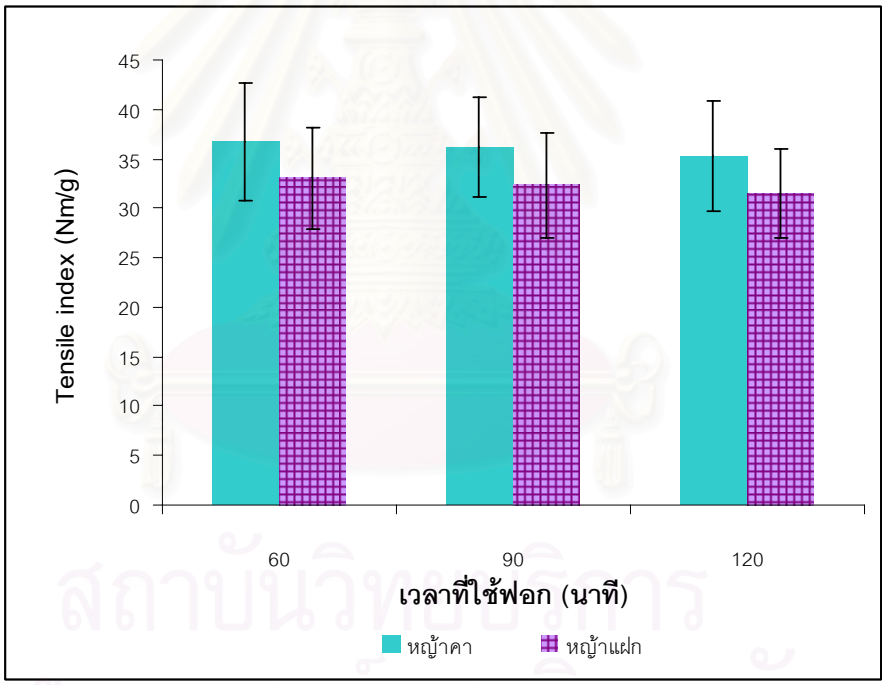
4.3.5 **ความแข็งแรงต่อแรงดึง**

จากตารางที่ 4.21 ภาพที่ 4.6 และภาพที่ 4.7 แสดงผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5% และ 10% ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับเดียวกันแต่เพิ่มเวลาในการฟอกให้นานขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากทั้งเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการฟอกด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นส่งผลทำให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายจากสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อมากขึ้นเช่นกัน [10]

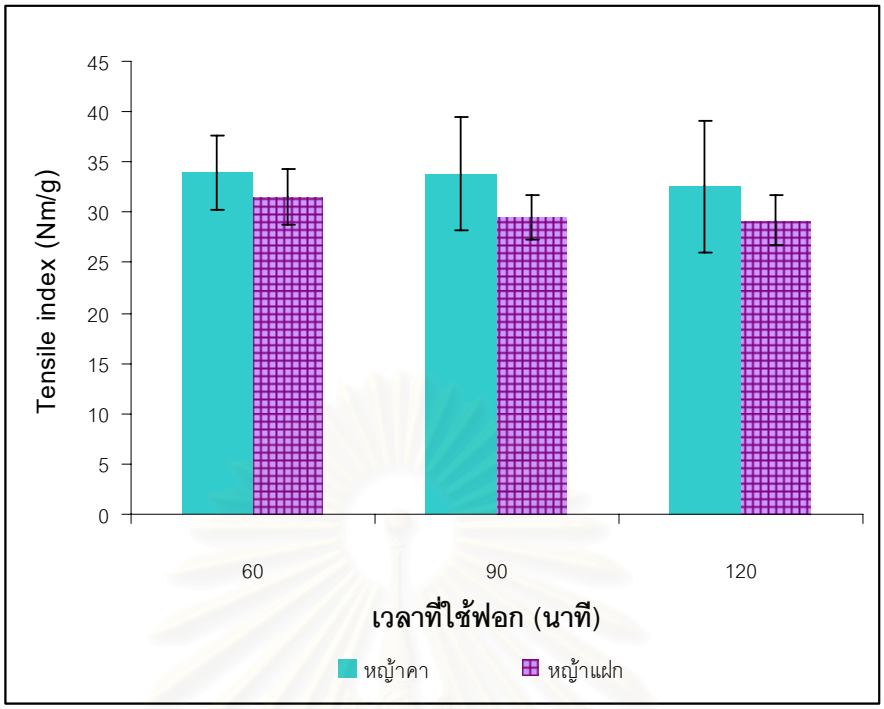
เมื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง นั่นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกจะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ นอกจากนี้ยังพบว่าเยื่อหญ้าคามีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าเยื่อหญ้าแฝก ซึ่งอาจจะเป็นเพราะการที่เยื่อหญ้าแฝกสามารถทำปฏิกิริยาการฟอกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ดีกว่าเยื่อหญ้าคา ส่งผลให้เยื่อหญ้าแฝกมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสเหลืออยู่ในเยื่อหลังทำการฟอกน้อยกว่าเยื่อหญ้าคา (ตารางที่ 4.16) ความแข็งแรงของเยื่อหญ้าแฝกหลังการฟอกเยื่อจึงต่ำกว่าหญ้าคา

ตารางที่ 4.21 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index, Nm/g)	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	36.76 ±5.97	33.05 ±5.11
	90	36.22 ±5.07	32.34 ±5.34
	120	35.29 ±5.57	31.50 ±4.55
10.0	60	33.97 ±3.68	31.52 ±2.80
	90	33.83 ±5.62	29.48 ±2.17
	120	32.61 ±6.56	29.23 ±2.41



ภาพที่ 4.6 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก



ภาพที่ 4.7 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์10% ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.3.6 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

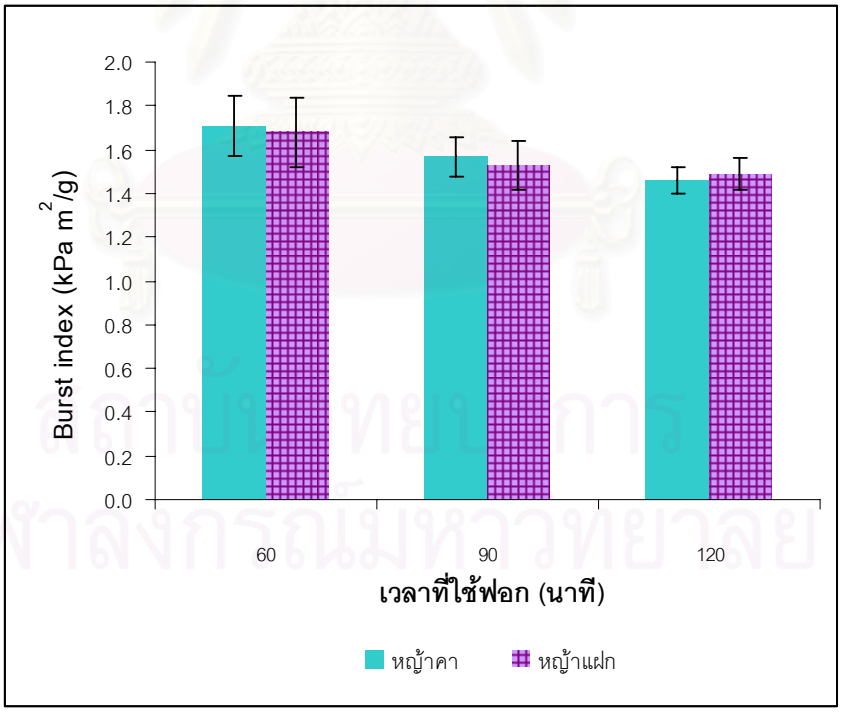
จากตารางที่ 4.22 ภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5% และ 10% พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเพิ่มเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ ซึ่งแนวโน้มค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษดังแสดงในตารางที่ 4.21 ภาพที่ 4.6 และภาพที่ 4.7

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาและการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อส่งผลต่อเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอย่างมาก ทำให้การสร้างพันธะของเส้นใยทำได้น้อยลงส่งผลทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลงด้วยเช่นกัน [10] และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกจะพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของหญ้าคามีแนวโน้มสูงกว่าของหญ้าแฝก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า หญ้าแฝกทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดีกว่าหญ้าคา ส่งผลให้เยื่อหญ้าแฝกมี

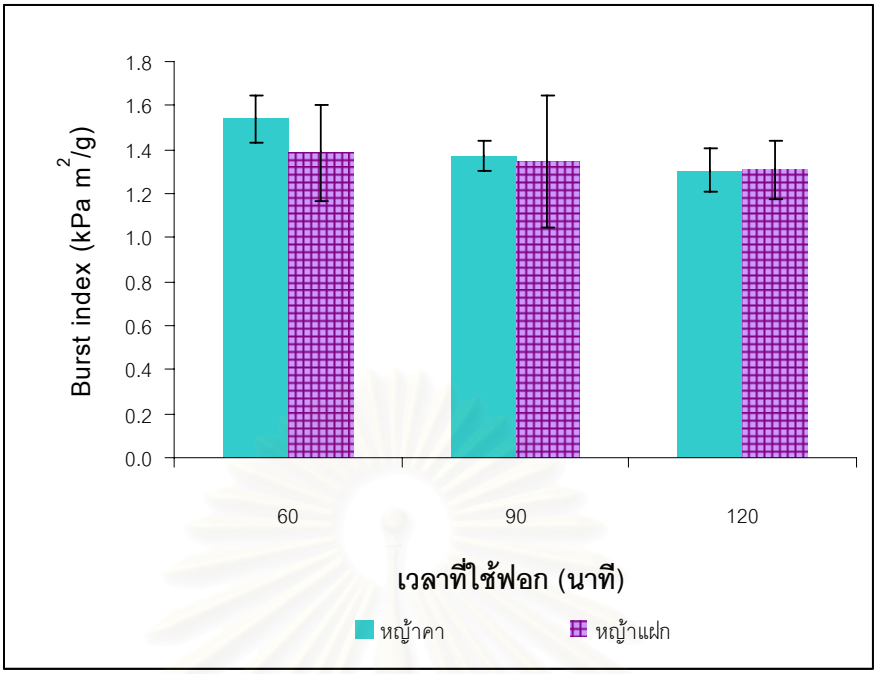
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสหลังการฟอกเยื่อน้อยกว่าหญ้าคา (ตารางที่ 4.16) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของหญ้าแฝกจึงต่ำกว่าหญ้าคา

ตารางที่ 4.22 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index, kPa m^2/g)	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	1.697 ±0.16	1.679 ±0.16
	90	1.568 ±0.09	1.530 ±0.11
	120	1.456 ±0.06	1.463 ±0.10
10.0	60	1.539 ±0.11	1.387 ±0.26
	90	1.374 ±0.07	1.347 ±0.41
	120	1.306 ±0.10	1.308 ±0.13



ภาพที่ 4.8 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก



ภาพที่ 4.9 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.3.7 ความต้านทานแรงฉีก

จากตารางที่ 4.23 ภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11 แสดงการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีทิศทางที่แตกต่างจากแนวโน้มความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ทั้งนี้เนื่องมาจากความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ มากกว่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเส้นใยอาจมีการสร้างพันธะน้อยลงแต่อยู่เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น [17] นอกจากนี้ อาจเป็นไปได้ว่า เยื่อมีปริมาณเส้นใยยาวมากขึ้น หรือมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ (Fines) น้อยลง (ดังจะเห็นได้จากค่าสภาพระบายได้ที่แสดงในตารางที่ 4.18 ที่มีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อมากขึ้น) ดังนั้นกระดาษจึงมีความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้น เนื่องจากมีเส้นใยยาวในระบบมากขึ้นนั่นเอง

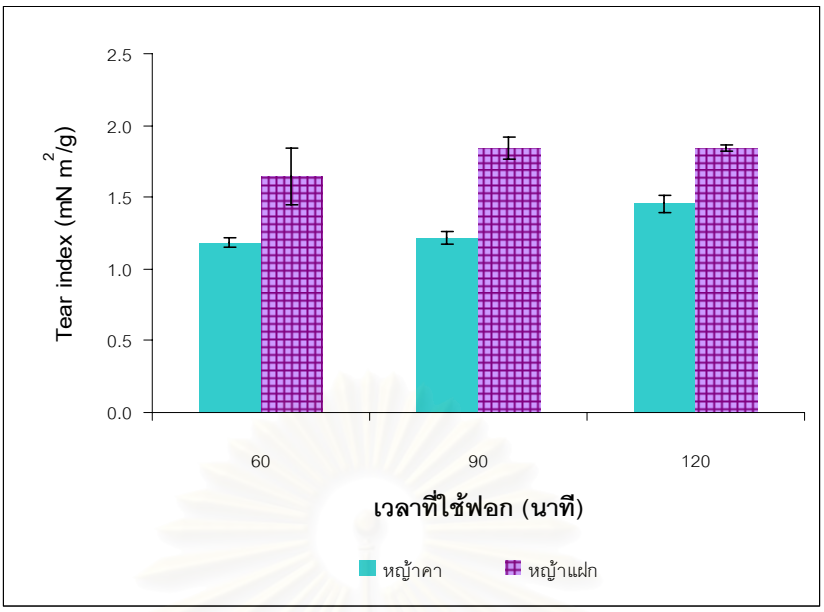
เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกจะพบว่าแนวโน้มของความต้านทานแรงฉีกมีทิศทางไปในแนวเดียวกัน คือ มีค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการฟอกที่นานขึ้นของทั้งการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5%

และ10% โดยค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อหญ้าแฝกจะมีค่าสูงกว่ากระดาษจากเยื่อหญ้าคาในทุกความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และทุกช่วงเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า หลังการฟอกเยื่อ กระดาษที่ผลิตจากหญ้าแฝกมีปริมาณเส้นใยยาวมากกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคา ดังจะเห็นได้จากค่าสภาพระบายได้ที่สูงกว่าของเยื่อหญ้าแฝก เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อหญ้าคา (ตารางที่ 4.18) จึงส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงฉีกสูงกว่า

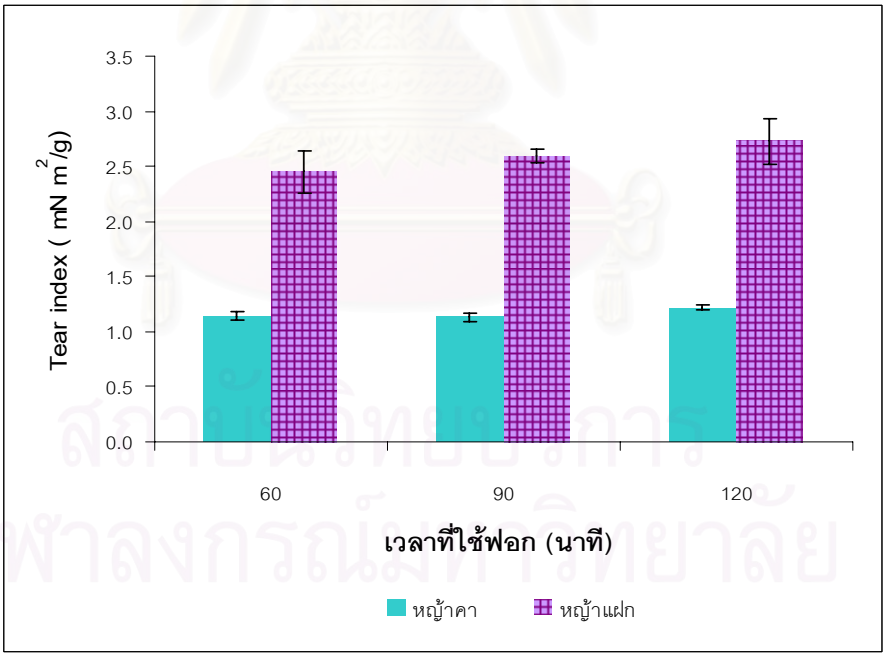
ตารางที่ 4.23 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2	เวลาที่ใช้	ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear index, mN m^2/g)	
(%)	(นาที)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	1.184 ±0.03	1.646 ±0.20
	90	1.216 ±0.04	1.842 ±0.08
	120	1.243 ±0.06	1.843 ±0.02
10.0	60	1.132 ±0.04	2.434 ±0.19
	90	1.143 ±0.04	2.593 ±0.06
	120	1.220 ±0.03	2.718 ±0.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.10 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก



ภาพที่ 4.11 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% ต่อค่าดัชนีต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

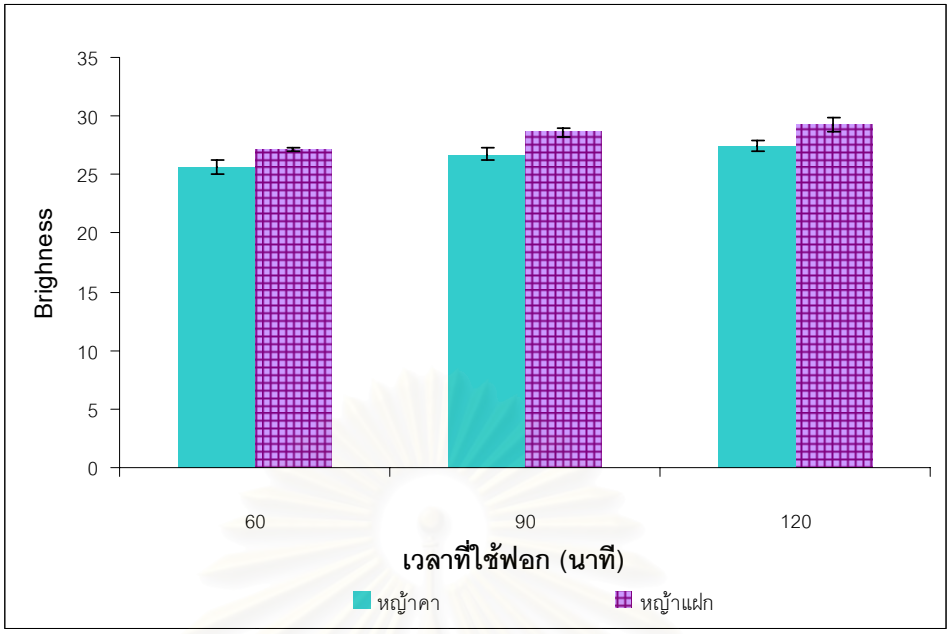
4.3.8 ความขาวสว่างของกระดาษ

จากตารางที่ 4.24 ภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 แสดงค่าความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5% และ 10% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการฟอกให้นานขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากทั้งหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระดับเดียวกัน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า กระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกมีค่าความขาวสว่างขาวขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าการฟอกด้วยปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิดอย่างชัดเจน โดยเฉพาะกระดาษจากเยื่อหญ้าแฝก

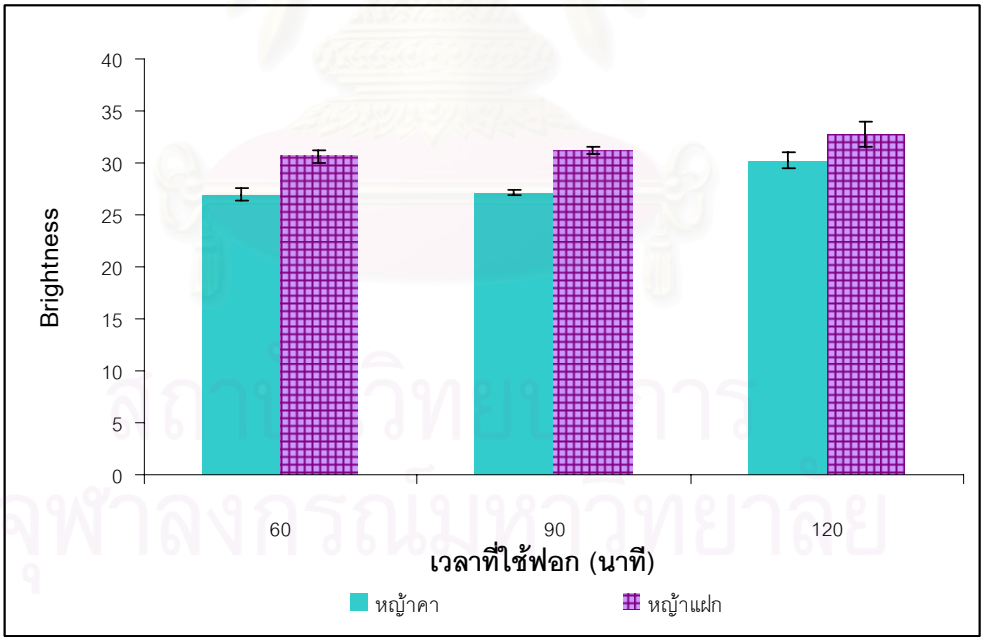
เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อทั้ง 2 ชนิด พบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าแฝกให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคาในทุกช่วงปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

ตารางที่ 4.24 ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่าความขาวสว่าง	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	25.69 ±0.6	27.14 ±0.2
	90	26.74 ±0.5	28.63 ±0.4
	120	27.46 ±0.5	29.24 ±0.6
10.0	60	26.92 ±0.6	30.63 ±0.6
	90	27.14 ±0.2	31.24 ±0.3
	120	30.24 ±0.8	32.81 ±1.2



ภาพที่ 4.12 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก



ภาพที่ 4.13 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

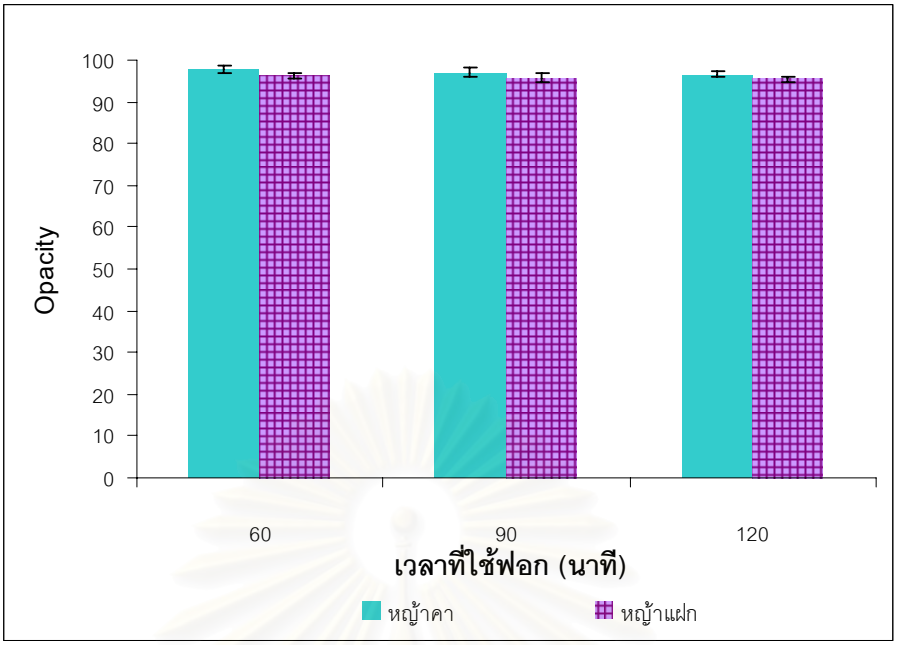
4.3.9 ความทึบแสงของกระดาษ

จากตารางที่ 4.25 ภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15 แสดงค่าความทึบแสงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5% และ 10% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการฟอกจะส่งผลทำให้แนวโน้มค่าความทึบแสงของกระดาษลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่เพิ่มเวลาในการฟอกให้นานขึ้นจะทำให้ลิกนินถูกทำลายมากขึ้น เส้นใยมีความหยุ่นตุวมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยสูงขึ้น จึงทำให้กระดาษทีเนื้อแน่นมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากความหนาแน่นของกระดาษที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการฟอกเพิ่มขึ้นและการใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกมากขึ้น (ตารางที่ 4.20) ส่งผลทำให้ช่องว่างภายในกระดาษลดลงและทำให้การกระเจิงของแสงลดลงด้วยเช่นกัน [17]

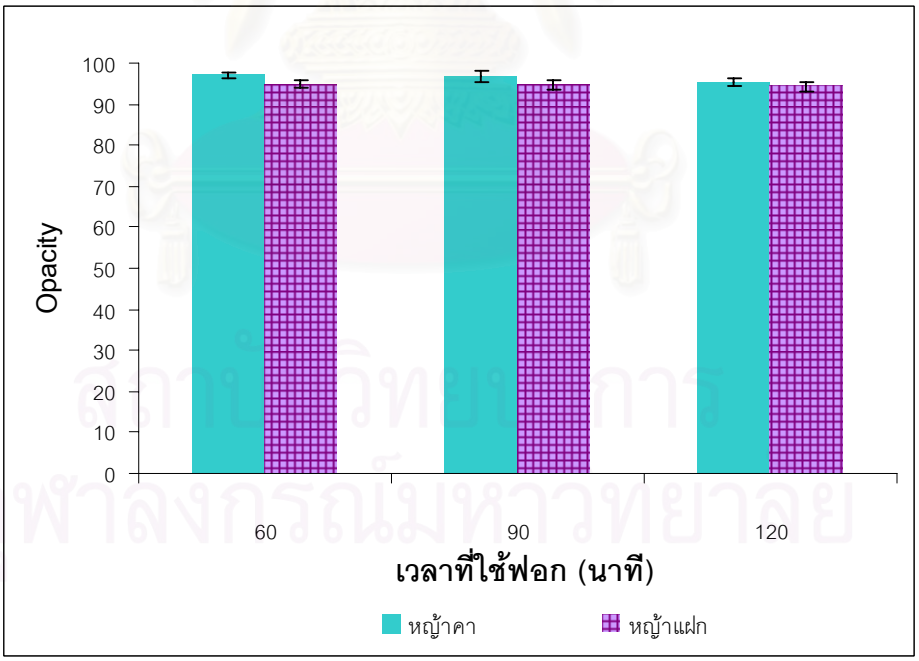
เมื่อเปรียบเทียบค่าความทึบแสงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกพบว่ากระดาษจากหญ้าคาจะมีความทึบแสงมากกว่ากระดาษจากหญ้าแฝกในทุกความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และทุก ๆ ช่วงเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่ออีกด้วย ทั้งนี้คงเป็นเพราะว่า กระดาษจากเยื่อหญ้าแฝกมีคสามหนาแน่นมากกว่ากระดาษจากเยื่อหญ้าคา ทำให้ช่องว่างภายในกระดาษน้อยลง ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าแฝกจึงต่ำกว่ากระดาษที่ผลิตจากหญ้าคา

ตารางที่ 4.25 ค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่าความทึบแสง	
		หญ้าคา	หญ้าแฝก
5.0	60	97.70 ±1.0	96.37 ±0.7
	90	97.02 ±1.4	95.60 ±2.1
	120	96.63 ±0.5	95.45 ±0.6
10.0	60	97.04 ±0.6	95.07 ±1.8
	90	96.79 ±1.9	94.83 ±1.2
	120	95.37 ±0.9	94.24 ±1.1



ภาพที่ 4.14 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก



ภาพที่ 4.15 ผลของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% ต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าคา

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	A			B			A* B		
	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง
- ปริมาณผลผลิต	0.206913	2.001196	5.987378	0.014432*	9.321813	5.143253	0.99128	0.008771	5.143253
- สภาพระบายได้	0.024267*	8.950282	5.987378	0.134727	2.851977	5.143253	0.80761	0.221469	5.143253
- ความหนาแน่น	0.02794*	0.10654	5.987378	0.10654	3.328244	5.143253	0.080814	3.938931	5.143253
- ความเรียบ	0.920363	0.000646*	5.987378	0.000646*	31.70652	5.143253	0.612459	0.532609	5.143253
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.008226*	120.0664	18.51282	0.05682	16.5994	19	-	-	-
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.006039*	164.093	18.51282	0.008865*	111.801	19	-	-	-
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.07655	11.58329	18.51282	0.09938	9.062401	19	-	-	-
- ความขาวสว่าง	0.169606	4.442335	18.51282	0.172124	4.809772	19	-	-	-
- ความทึบแสง	0.021702*	5.757255	18.51282	0.121152	7.254072	19	-	-	-

หมายเหตุ: A คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (5% และ 10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ) B คือ เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (60, 90 และ 120 นาที) และ A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ โดยในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อชนิดต่างๆ ขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อชนิดขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่า F ที่ได้จากตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

เนื่องจากการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (A) และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (B) ต่อสมบัติของเยื่อ อันได้แก่ ปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ และต่อสมบัติของกระดาษ อันได้แก่ ความหนาแน่นและความเรียบ เป็นการทำการทดลองที่มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้สามารถพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแประหว่างตัวแปร (A*B) ได้ ในขณะที่อิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อสมบัติของกระดาษที่เหลือ อันได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความต้านทานแรงฉีก ความขาวสว่าง และความทึบแสง เป็นการทำการทดลองครั้งเดียว ไม่มีการทำซ้ำ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร คือ ชนิดของหญ้าและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A*B) จึงไม่มี

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.26 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (A) และ เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (B) ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าคา พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ ความหนาแน่นของกระดาษ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและความทึบแสง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและความเรียบของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีค่า F คำนวณมากกว่าค่า F จากตาราง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าแฝก

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	A			B			A* B		
	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง
- ปริมาณผลผลิต	0.000952*	36.18364	5.987378	0.001122*	25.87238	5.143253	0.472674	0.851241	5.143253
- สภาพระบายได้	0.18632	2.225832	5.987378	0.095287	3.568146	5.143253	0.962154	0.038827*	5.143253
- ความหนาแน่น	0.007164*	15.95586	5.987378	0.000768*	29.75281	5.143253	0.055121	4.882825	5.143253
- ความเรียบ	0.036245*	7.214596	5.987378	2.66E-05*	97.50644	5.143253	0.006244*	13.29185	5.143253
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.028748*	33.2925	18.51282	0.101855	8.817909	19	-	-	-
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.037392*	25.25291	18.51282	0.19003	4.262327	19	-	-	-
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.00208*	479.3449	18.51282	0.061156	15.35173	19	-	-	-
- ความขาวสว่าง	0.00898*	109.8554	18.51282	0.058225	16.14239	19	-	-	-
- ความทึบแสง	0.021702*	44.58516	18.51282	0.094391	9.594281	19	-	-	-

หมายเหตุ: A คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (5% และ 10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ) B คือ เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (60, 90 และ 120 นาที) และ A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ โดยในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อชนิดต่างๆ ขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อชนิดขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่า F ที่ได้จากตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

เนื่องจากการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (A) และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (B) ต่อสมบัติของเยื่อ อันได้แก่ ปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ และต่อสมบัติของกระดาษ อันได้แก่ ความหนาแน่นและความเรียบ เป็นการทำการทดลองที่มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้สามารถพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแประหว่างตัวแปร (A*B) ได้ ในขณะที่อิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อต่อสมบัติของกระดาษที่เหลือ อันได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความต้านทานแรงฉีก ความขาวสว่าง และความทึบแสง เป็นการทำการทดลองครั้งเดียว ไม่มีการทำซ้ำ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร คือ ชนิดของหญ้าและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A*B) จึงไม่มี

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.27 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (A) และ เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (B) ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าแฝก พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิต ความหนาแน่นของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้ ความเรียบ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความต้านทานแรงฉีก ความขาวสว่างและความทึบแสง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิต ความหนาแน่นและความเรียบของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้ นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว (A*B) ก็มีผลต่อสภาพระบายได้ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีค่า F คำนวณมากกว่าค่า F จากตาราง

4.3.10 *ภาวะที่เหมาะสมในการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์*

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับ 5% และ 10% แต่ใช้เวลาในการฟอกที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งแรงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกอย่างมาก ดังนั้นการทดลองในข้างต้นจึงเลือกภาวะของการฟอกเยื่อที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับ 5% และ 10% เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ 60 นาที เพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป เนื่องจากให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุที่ดีที่สุด และให้ค่าความขาวสว่างและความทึบแสงไม่แตกต่างจากเวลาอื่นๆ ที่ใช้ในการฟอกเยื่อมากนั้น

4.4 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่มีต่อเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.4 นี่ เป็นผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 3 ซึ่งศึกษาผลของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก โดยผลการทดลองที่ได้ มีดังนี้

4.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

จากตารางที่ 4.28 แสดงองค์ประกอบทางเคมีหลังฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่า การฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่าง ๆ ไม่ค่อยส่งผลต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสมากขึ้น ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกจะพบว่า เยื่อหญ้าคามีปริมาณองค์ประกอบของแอลฟาเซลลูโลสมากกว่าเยื่อหญ้าแฝกทั้งการใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับ 6.2 IU/g และ 18.6 IU/g แต่เยื่อหญ้าคาจะมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่น้อยกว่าหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.28 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

ชนิดวัชพืช	ไซแลนแนส (IU/g)	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (%)				
		โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
หญ้าคา	6.2	89.28	62.01	27.27	9.05	2.34
	18.6	89.51	62.16	27.35	8.73	2.16
หญ้าแฝก	6.2	86.17	56.88	28.36	10.90	2.45
	18.6	86.34	57.18	28.23	10.96	2.38

4.4.2 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

จากตารางที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้ คือเมื่อใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเอนไซม์ไซแลนเนสจะเข้าไปย่อยสลายในส่วนของไซแลนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส ทำให้เฮมิเซลลูโลส

บางส่วนถูกกำจัดออกไป [10] นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากการที่เอนไซม์ที่ใช้ฟอกมีส่วนผสมของเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณเล็กน้อย ซึ่งเอนไซม์เซลลูเลสอาจไปย่อยสลายในส่วนของเซลลูโลสด้วยเช่นกัน จึงทำให้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้ลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อมากขึ้นอีกด้วย [23]

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้หลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสของหญ้าคาและหญ้าแฝกพบว่า ปริมาณผลผลิตเยื่อของหญ้าคาสูงกว่าเยื่อหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอก โดยปริมาณผลผลิตเยื่อสูงสุดจะอยู่ที่การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในระดับ 6.2 IU/g

ตารางที่ 4.29 ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (Yield) ที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	86.71 ±2.5	72.80 ±2.2
18.6	83.31 ±2.6	68.21 ±1.3
31.0	82.60 ±0.6	64.63 ±1.8

4.4.3 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

จากตารางที่ 4.30 แสดงค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผ่านการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส จากการทดลองพบว่า ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเพิ่มขึ้น แสดงว่าความสามารถในการอุ้มน้ำของเยื่อลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้การย่อยสลายในส่วนของไซแลนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้น ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง ความสามารถในการอุ้งน้ำของเส้นใยจึงลดลง ทำให้ค่าสภาพระบายได้มีค่าสูงขึ้น [27]

เมื่อเปรียบเทียบค่าการระบายน้ำของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก พบว่า เยื่อหญ้าคามีค่าสภาพระบายได้ที่ต่ำกว่าหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อด้วย ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ด้วย

เหตุผลที่อาจเป็นไปได้ว่า ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) ของเยื่อหญ้าคามีปริมาณสูงกว่าเยื่อหญ้าแฝกนั่นเอง

ตารางที่ 4.30 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของเยื่อที่ได้จากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ค่าสภาพระบายได้ (CSF, mL)	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	369 ±11.3	470 ±11.2
18.6	420 ±9.9	528 ±8.5
31.0	462 ±12.7	553 ±8.3

4.4.4 ความหนาแน่นและความเรียบ

จากตารางที่ 4.31 แสดงค่าความหนาแน่นของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ลิกนินถูกกำจัดออกจากเยื่อมากขึ้นทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยของเยื่อทำได้ดีขึ้น ซึ่งการที่ลิกนินถูกกำจัดออกไปนั้น เกิดจากการที่เอนไซม์ไซแลนเนสไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยในส่วนที่เป็นไซแลน จึงคล้ายกับเป็นการเปิดผิวของเส้นใยให้กรดเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้มากขึ้น (การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสต้องมีการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วงประมาณ 5 ซึ่งเป็นช่วงกรด) ส่งผลให้ปริมาณลิกนินลดน้อยลง เนื่องจากลิกนินถูกทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิกริก นอกจากนี้การฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นอาจทำให้ผนังของเส้นใยบางลงเนื่องมาจากการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลทำให้ผนังของเส้นใยอ่อนตัวได้มากขึ้นอีกด้วย [27] จึงส่งผลให้กระดาษมีเนื้อแน่นมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่า กระดาษจากหญ้าแฝกค่อนข้างมีความหนาแน่นมากกว่าหญ้าคา ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.31 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ความหนาแน่น (g/cm^3)	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	0.610 ±0.06	0.646 ±0.06
18.6	0.656 ±0.08	0.650 ±0.10
31.0	0.657 ±0.01	0.661 ±0.06

นอกจากนี้ยังพบว่าการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสด้วยความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลต่อความเรียบของกระดาษจะเห็นได้จากตารางที่ 4.32 พบว่ากระดาษมีแนวโน้มของความเรียบที่สูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าผิวหน้าของกระดาษมีความสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยมีการสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น เส้นใยมีความหยุ่นตัวสูงขึ้น กระดาษที่ได้จึงมีเนื้อแน่นและเรียบมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความเรียบของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่า กระดาษจากเยื่อหญ้าแฝกมีความเรียบมากกว่ากระดาษจากเยื่อหญ้าคา ในทุกช่วงปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.32 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ความเรียบ (Sec)	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	8.6 ±1.8	9.5 ±3.2
18.6	9.7 ±2.0	11.3 ±1.7
31.0	11.0 ±1.5	11.5 ±2.0

4.4.5 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

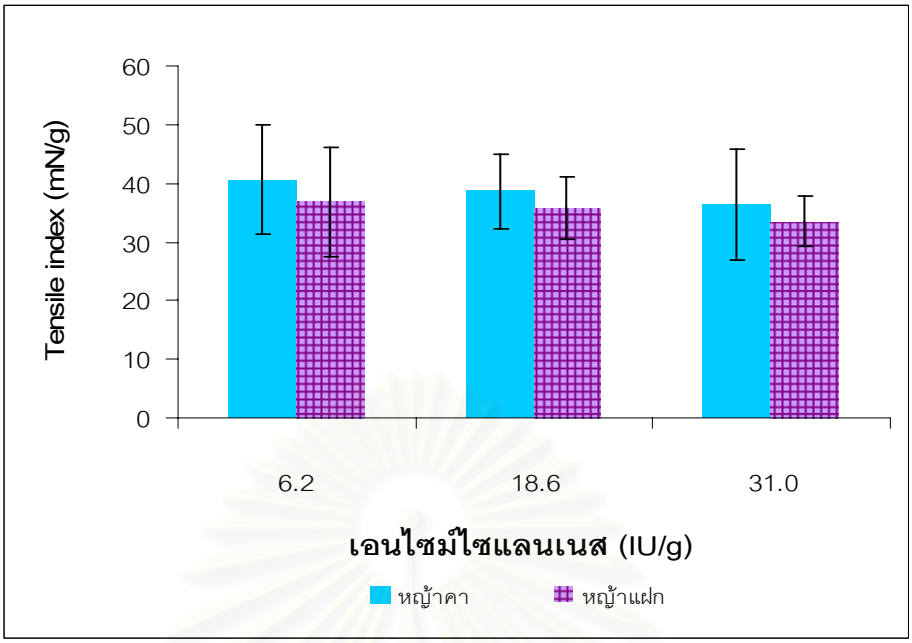
จากตารางที่ 4.33 และภาพที่ 4.16 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส จากการทดลองพบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอก ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยในส่วนของเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายได้มากขึ้น ทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยทำได้น้อยลง ส่งผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงด้วยเช่นกัน [17] ดังนั้นแสดงว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณความเข้มข้นที่สูงจนเกินไปจะส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกเป็นอย่างมาก

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสพบว่า กระดาษจากหญ้าคามีแนวโน้มความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูงกว่ากระดาษจากหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า หญ้าคาหลังการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ไซแลนเนสมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูงกว่าหญ้าแฝกนั่นเอง (ตารางที่ 4.28)

ตารางที่ 4.33 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index, Nm/g)	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	40.61 ±9.3	36.93 ±9.3
18.6	38.62 ±6.3	35.84 ±5.3
31.0	36.44 ±9.4	33.48 ±4.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.16 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

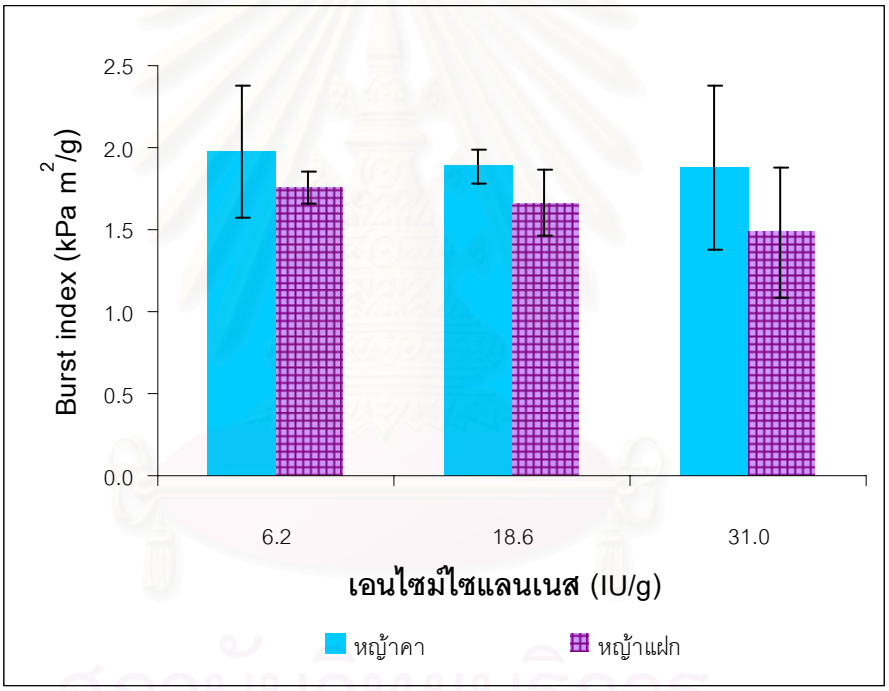
4.4.6 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

จากตารางที่ 4.34 และภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสมีแนวโน้มลดลงและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อส่งผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ลดลง ทั้งนี้คงเป็นเพราะว่าการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายมากขึ้น ทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยน้อยลง [27]

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกพบว่า กระดาษจากหญ้าคามีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงกว่าหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกอีกด้วย ผลที่ได้สอดคล้องกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารฟอกเยื่อเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า หญ้าคาหลังการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ไซแลนเนสมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูงกว่าหญ้าแฝกนั่นเอง (ตารางที่ 4.28)

ตารางที่ 4.34 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index, kPa m^2/g)	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	1.972 ±0.5	1.754 ±0.1
18.6	1.886 ±0.1	1.661 ±0.2
31.0	1.873 ±0.5	1.562 ±0.4



ภาพที่ 4.17 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

4.4.7 ความต้านทานแรงฉีก

จากตารางที่ 4.35 และภาพที่ 4.18 แสดงค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษของหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการ

เพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกส่งผลทำให้กระดาษมีความแข็งแรงในแนวระนาบมากขึ้น [27] นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ที่ว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสส่งผลให้ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานแรงฉีกนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าพันธะระหว่างเส้นใย

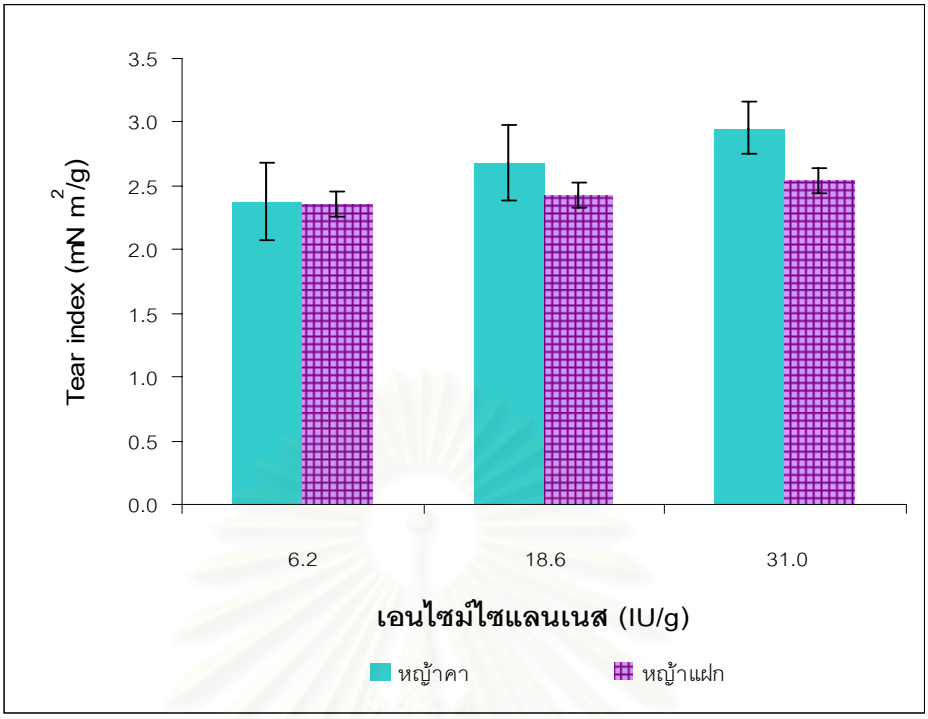
นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีแนวโน้มที่แตกต่างกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในทุกสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบค่าดุชะนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่าเยื่อจากหญ้าคาที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ไซแลนเนสมีแนวโน้มที่ให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่ากระดาษที่ได้จากหญ้าแฝก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าปริมาณแอลฟาเซลลูโลสของหญ้าคามีมากกว่าหญ้าแฝก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.28 จึงทำให้เส้นใยหญ้าคามีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.35 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear index, mN m^2/g)	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	2.376 ±0.3	2.361 ±0.1
18.6	2.684 ±0.3	2.430 ±0.1
31.0	2.955 ±0.2	2.535 ±0.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.18 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

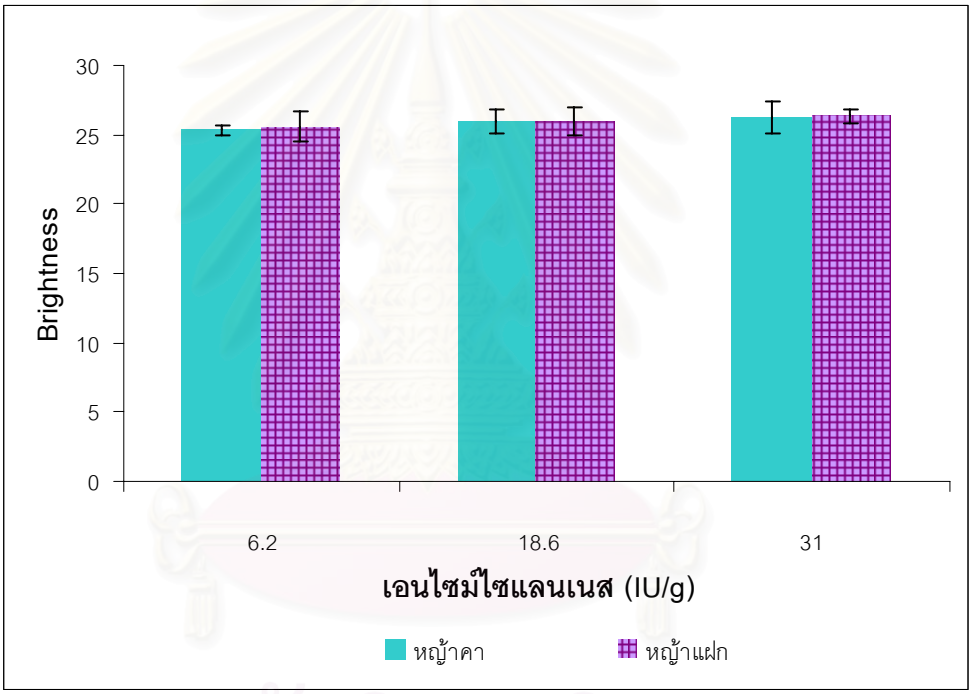
4.4.8 ค่าความขาวสว่าง

จากตารางที่ 4.36 และภาพที่ 4.19 แสดงค่าความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส จากผลการทดลองพบว่าค่าความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกเยื่อแล้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อไม่ได้เป็นการกำจัดลิกนินโดยตรง แต่การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกจะเข้าไปย่อยสลายส่วนของไซแลนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและส่งผลต่อลิกนินที่อยู่ที่เชื่อมติดกับเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกมาด้วย การทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการปรับสภาพค่า pH ให้อยู่เท่ากับประมาณ 5 [27]

เมื่อเปรียบเทียบค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่า กระดาษที่ผลิตจากหญ้าแฝกมีแนวโน้มให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อหญ้าคา ซึ่งผลที่ได้ค่อนข้างสอดคล้องกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารฟอกเยื่อเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.36 ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ค่าความขาวสว่าง	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	25.32 ±0.3	25.60 ±1.1
18.6	25.96 ±1.2	26.01 ±1.0
31.0	26.24 ±1.8	26.37 ±0.5



ภาพที่ 4.19 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

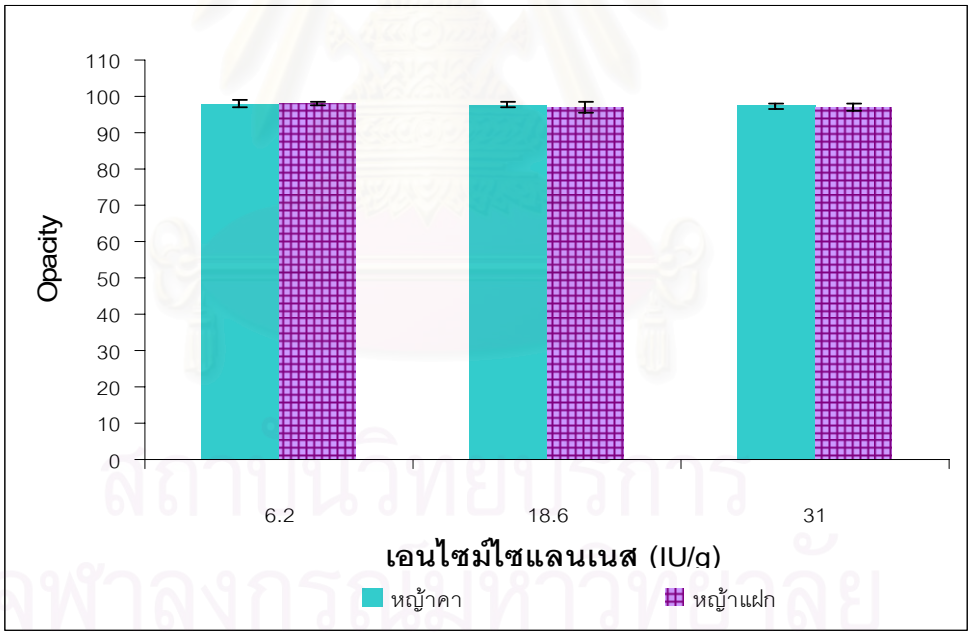
4.4.9 ค่าความทึบแสง

จากตารางที่ 4.37 และภาพที่ 4.20 แสดงค่าความทึบแสงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส จากผลการทดลองพบว่าค่าความทึบแสงมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระดาษมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.31) ทำให้พื้นที่ภายในกระดาษมีช่องว่างลดลงส่งผลต่อการกระเจิง

แสงที่ลดลงด้วย [17] และเมื่อเปรียบเทียบความความทึบแสงของกระดาษจากหญ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่ากระดาษจากหญ้าคามีแนวโน้มให้ค่าความทึบแสงสูงกว่ากระดาษจากหญ้าแฝก เนื่องจากกระดาษจากหญ้าคามีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าหญ้าแฝกนั่นเอง (ตารางที่ 4.31)

ตารางที่ 4.37 ค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

เอนไซม์ไซแลนเนส	ค่าความทึบแสง	
(IU/g)	หญ้าคา	หญ้าแฝก
6.2	98.04 ±1.5	97.82 ±0.5
18.6	97.70 ±0.6	97.16 ±1.9
31.0	97.45 ±0.7	96.98 ±0.9



ภาพที่ 4.20 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสต่อค่าความทึบแสงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ตารางที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและชนิดของหญ้าที่มีผลต่อสมบัติเยื่อและกระดาษ

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	A			B			A* B		
	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง	P-value	F คำนวณ	F ตาราง
- ปริมาณผลผลิต	9.15E-06*	189.4491	5.987378	0.012285*	10.00166	5.143253	0.385591	1.121723	5.143253
- สภาพระบายได้	2.02E-05*	144.2308	5.987378	0.00394*	37.9375	5.143253	0.717555	0.350962	5.143253
- ความหนาแน่น	0.629287	0.258521	5.987378	0.553137	0.654633	5.143253	0.60344	0.550114	5.143253
- ความเรียบ	0.042732*	6.569343	5.987378	0.009933*	10.9562	5.143253	0.542293	0.678832	5.143253
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.007581*	130.418	18.51282	0.015201*	64.78718	19	-	-	-
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.012037*	81.58169	18.51282	0.115449	7.661811	19	-	-	-
- ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	0.178853	4.1403	18.51282	0.21276	3.700138	19	-	-	-
- ความขาวสว่าง	0.150765	5.173594	18.51282	0.018382*	53.40098	19	-	-	-
- ความทึบแสง	0.051796	17.81979	18.51282	0.049947*	19.0212	19	-	-	-

หมายเหตุ: A คือ ชนิดของหญ้า (หญ้าคา และหญ้าแฝก) B คือ ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (6.2, 18.6 และ 31 IU/g โดยเป็นกรัมของน้ำหนักเยื่อแห้ง) และ A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของหญ้าและปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ โดยในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อชนิดต่างๆ ขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อชนิดขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่า F ที่ได้จากตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

เนื่องจากการทดลองศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดของหญ้า (A) และปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (B) ต่อสมบัติของเยื่อ อันได้แก่ ปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ และต่อสมบัติของกระดาษ อันได้แก่ ความหนาแน่นและความเรียบ เป็นการทำการทดลองที่มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้สามารถพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแประหว่างตัวแปร (A*B) ได้ ในขณะที่อิทธิพลของชนิดของหญ้าและปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสต่อสมบัติของกระดาษที่เหลือ อันได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความต้านทานแรงฉีก ความขาวสว่างและความทึบแสง เป็นการทำการทดลองครั้งเดียว ไม่มีการทำซ้ำ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร คือ ชนิดของหญ้าและปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (A*B) จึงไม่มี

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.38 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดของหญ้า (A) และปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (B) ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษพบว่าชนิดของหญ้าที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ของเยื่อ ความเรียบของกระดาษ ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ในขณะที่ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ของเยื่อ ความเรียบของกระดาษ ความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีค่า F คำนวณมากกว่าค่า F จากตาราง

4.4.10 ภาวะที่เหมาะสมในการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

จากการทดลองข้างต้นพบว่าภาวะของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกที่เหมาะสมที่สุดคือ ปริมาณความเข้มข้นที่ระดับ 6.2 IU/g และ 18.6 IU/g เนื่องจากมีค่าดัชนีความแข็งแรงที่ไม่แตกต่างกันมากนั้นและให้ค่าความขาวสว่างที่ใกล้เคียงกันทั้งกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก ดังนั้นจึงเลือกปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสทั้ง 2 ระดับนี้ในการทดลองขั้นตอนไป

4.5 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.5 นี้ เป็นผลของการทดลองตอนที่ 4 ซึ่งศึกษาผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.5.1 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

จากตารางที่ 4.39 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อของหญ้าคาและหญ้าแฝก จากการทดลองพบว่า การใช้เอนไซม์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลทำให้ปริมาณผลผลิตเยื่อลดลง โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการลดลงของผลผลิตของเยื่อมากกว่าเอนไซม์ไซแลนเนส และเมื่อมีการใช้ปริมาณของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น ปริมาณผลผลิตของเยื่อก็ยิ่งลดลงมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เส้นใยของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกถูกทำลายมากขึ้น คือ เอนไซม์ไซแลนเนสจะเข้าไปย่อยสลายในส่วนของไซแลนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส โดยจะส่งผลต่อลิกนินที่เชื่อมต่อกับเฮมิเซลลูโลสให้ถูกกำจัดออกไปด้วย ในขณะที่การฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ส่งผลทำให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายด้วยเช่นกัน [27]

นอกจากนี้ยังพบว่าเยื่อหญ้าคาหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่สูงกว่าหญ้าแฝกในทุกๆ ภาวะของการฟอกเยื่อ

ตารางที่ 4.39 ปริมาณผลผลิตเยื่อ (Yield) ของหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	100 ±0.0	89.15 ±1.0	88.40 ±2.5	100 ±0.0	79.41 ±1.6	77.29 ±3.1
5	85.00 ±3.0	72.00 ±1.6	69.05 ±2.7	75.42 ±1.5	62.80 ±0.4	58.90 ±3.4
10	81.10 ±3.5	69.05 ±0.2	65.20 ±3.3	71.42 ±3.6	60.00 ±1.4	56.35 ±5.0

4.5.2 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอก

จากตารางที่ 4.40 แสดงค่าสภาพระบายได้ของหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน จากตารางพบว่า ค่าสภาพระบายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลต่อการทำลายเส้นใย โดยเฉพาะในส่วนของเฮมิเซลลูโลส จึงทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของเยื่อลดลง ในขณะเดียวกันการใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสมากขึ้น ทำให้ไซแลน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายมากขึ้นเช่นเดียวกัน ความสามารถในการอุ้มน้ำของเยื่อจึงยิ่งลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหญ้าคามีแนวโน้มที่ต่ำกว่าเยื่อหญ้าแฝกในทุกๆ ภาวะของการฟอกเยื่อ

ตารางที่ 4.40 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ	ค่าการระบายน้ำ (CFS, mL)					
H_2O_2	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
(%)	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	306 ±9.9	320 ±9.9	348 ±11.3	378 ±4.2	429 ±11.3	441 ±15.6
5	367 ±9.4	417 ±9.8	452 ±10.2	452 ±4.2	495 ±7.0	528 ±9.9
10	388 ±8.5	425 ±2.6	481 ±5.4	472 ±14.1	512 ±9.6	539 ±9.7

4.5.3 ความหนาแน่นและความเรียบ

จากตารางที่ 4.41 แสดงความหนาแน่นของกระดาษของหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน จากการทดลองพบว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของกระดาษทั้งที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ทั้งเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (เยื่อไม่ผ่านการฟอกหรือการทดลองควบคุม) อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และของเอนไซม์ไซแลนเนสกลับมีทิศทางที่ไม่แน่นอน ไม่เหมือนกับกรณีที่ฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือเอนไซม์ไซแลนเนสอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว (ผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 และการทดลองตอนที่ 3) นอกจากนี้ยังพบว่า

ความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเอนไซม์ไซแลนเนสกลับให้ผลที่ไม่ชัดเจน ไม่เหมือนกับในกรณีที่ฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือเอนไซม์ไซแลนเนสอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว (ผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 และการทดลองตอนที่ 3)

ตารางที่ 4.41 ความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ	ความหนาแน่น (g/cm^3)					
H_2O_2	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
(%)	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	0.658 ±0.04	0.537 ±0.05	0.569 ±0.06	0.724 ±0.08	0.637 ±0.08	0.660 ±0.09
5	0.614 ±0.08	0.660 ±0.09	0.630 ±0.09	0.610 ±0.07	0.586 ±0.07	0.616 ±0.06
10	0.617 ±0.09	0.596 ±0.04	0.569 ±0.07	0.628 ±0.07	0.610 ±0.07	0.628 ±0.07

นอกจากนี้ยังพบว่ากระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกเยื่อด้วยความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภาวะต่างๆ มีแนวโน้มทำให้กระดาษมีความเรียบลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ทั้งเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (เยื่อไม่ผ่านการฟอกหรือการทดลองควบคุม) เนื่องจากใช้เวลาในการให้อากาศเดินทางผ่านช่องว่างน้อยลง แสดงว่ากระดาษมีช่องว่างมากขึ้นหรือมีความเรียบน้อยลงนั่นเอง (ตารางที่ 4.42) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจไปทำลายเส้นใย โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นคาร์บอไฮเดรต ซึ่งก็คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จึงมีผลทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยลดน้อยลง กระดาษจึงมีผิวหน้าไม่เรียบเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้ทั้งเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และของเอนไซม์ไซแลนเนสกลับมีทิศทางที่ไม่แน่นอน ไม่เหมือนกับกรณีที่ฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือเอนไซม์ไซแลนเนสอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว (ผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 และการทดลองตอนที่ 3)

นอกจากนี้ยังพบว่ากระดาษจากหญ้าแฝกมีแนวโน้มให้ค่าความเรียบสูงกว่ากระดาษจากหญ้าคาในส่วนใหญ่ของภาวะที่ใช้ในการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ

ตารางที่ 4.42 ความเรียบของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ความเรียบ (Sec)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	7.7 ±1.5	5.1 ±1.6	5.5 ±1.1	13.0 ±1.7	8.7 ±1.3	11.9 ±1.5
5	6.3 ±1.3	6.2 ±1.7	6.7 ±1.4	12.5 ±1.6	10.4 ±0.7	12.6 ±1.8
10	6.2 ±1.7	6.5 ±1.4	6.9 ±1.3	12.4 ±1.1	11.5 ±1.2	12.9 ±1.4

4.5.4 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากตารางที่ 4.43 และภาพที่ 4.21 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน จากการทดลองพบว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก และความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเอนไซม์ไซแลนเนสไปย่อยสลายไซแลน ทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดน้อยลง เส้นใยรับน้ำได้น้อยลง การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงด้อยลง นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจไปทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยด้วยเช่นเดียวกัน ส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจึงลดลง

อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่ความเข้มข้นไม่สูงมากนัก ความแข็งแรงต่อแรงดึงกลับมีแนวโน้มที่ดีขึ้นกว่าการใช้ H_2O_2 อย่างเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเป็นการช่วยปรับสภาพเส้นใยมากกว่าการเข้าไปทำลายเส้นใย [25] และเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกต่อจากการใช้เอนไซม์ ส่งผลทำให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายน้อยลงแต่จะไปทำปฏิกิริยากับลิกนินมากขึ้น คือทำให้สามารถละลายลิกนินได้มากขึ้นนั่นเอง [27] แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระดับสูงขึ้น กลับพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

ของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นแบบรุนแรงขึ้นนั่นเอง

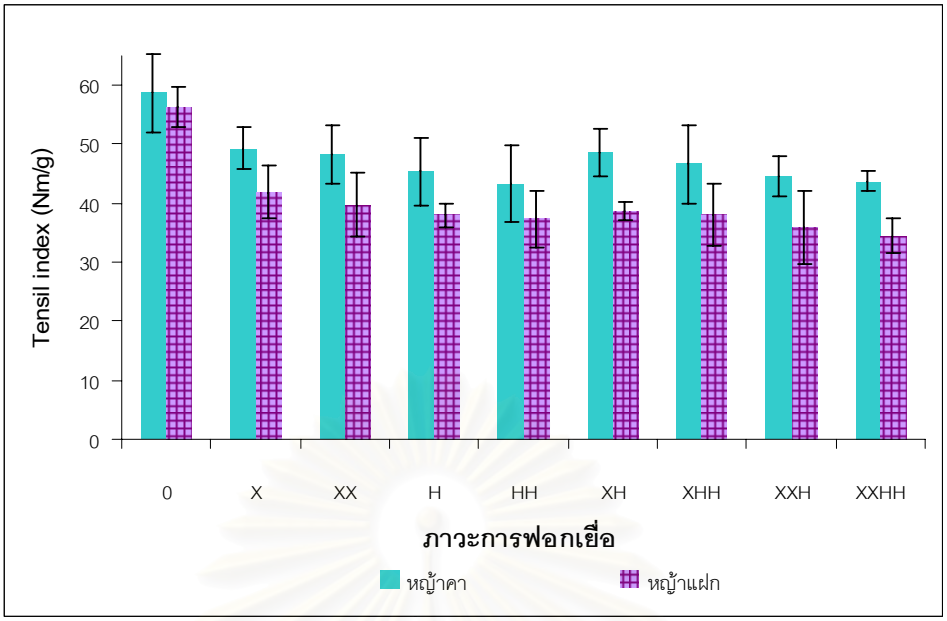
ภาวะการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด คือ ภาวะที่ใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำสุด นั่นคือ เมื่อใช้เอนไซม์ไซแลนเนส 6.2 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก พบว่า แนวโน้มความแข็งแรงต่อแรงดึงของหญ้าคาสูงกว่าหญ้าแฝกในทุกๆ ภาวะของการฟอกเยื่อ

ตารางที่ 4.43 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	58.73 ±7.7	49.30 ±4.5	48.28 ±6.9	56.40 ±4.4	41.81 ±5.5	39.70 ±6.4
5	45.41 ±6.7	48.64 ±7.6	44.54 ±5.1	37.99 ±3.0	38.64 ±5.8	35.89 ±2.5
10	43.36 ±7.6	46.68 ±4.5	43.71 ±2.7	37.34 ±6.2	37.98 ±7.2	34.49 ±3.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**หมายเหตุ 0= ไม่ฟอก, X=6.2 IU/g, XX= 18.6 IU/g, H=5%H_2O_2, HH=10%H_2O_2, XH=6.2 IU/g + 5%H_2O_2, XHH=6.2 IU/g +10%H_2O_2, XXH=18.6 IU/g + 5%H_2O_2 และ XXHH=18.6 IU/g+10%H_2O_2

ภาพที่ 4.21 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

4.5.5 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

จากตารางที่ 4.44 และภาพที่ 4.22 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน จากการทดลองพบว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไปในกรณีของความแข็งแรงต่อแรงดึง กล่าวคือ เอนไซม์ไซแลนเนสอาจไปย่อยสลายไซแลน ทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดน้อยลง เส้นใยรับน้ำได้น้อยลง การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงด้อยลง นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจไปทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยด้วยเช่นเดียวกัน ส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจึงลดลง

อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่ความเข้มข้นไม่สูงมากนัก ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุกลับมีแนวโน้มที่ดีขึ้นกว่าการใช้ H_2O_2 อย่างเดียว ซึ่งผลที่ได้ให้แนวโน้มเหมือนกับกรณีของความแข็งแรงต่อแรงดึง และด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นในกรณีของความแข็งแรงต่อแรงดึง

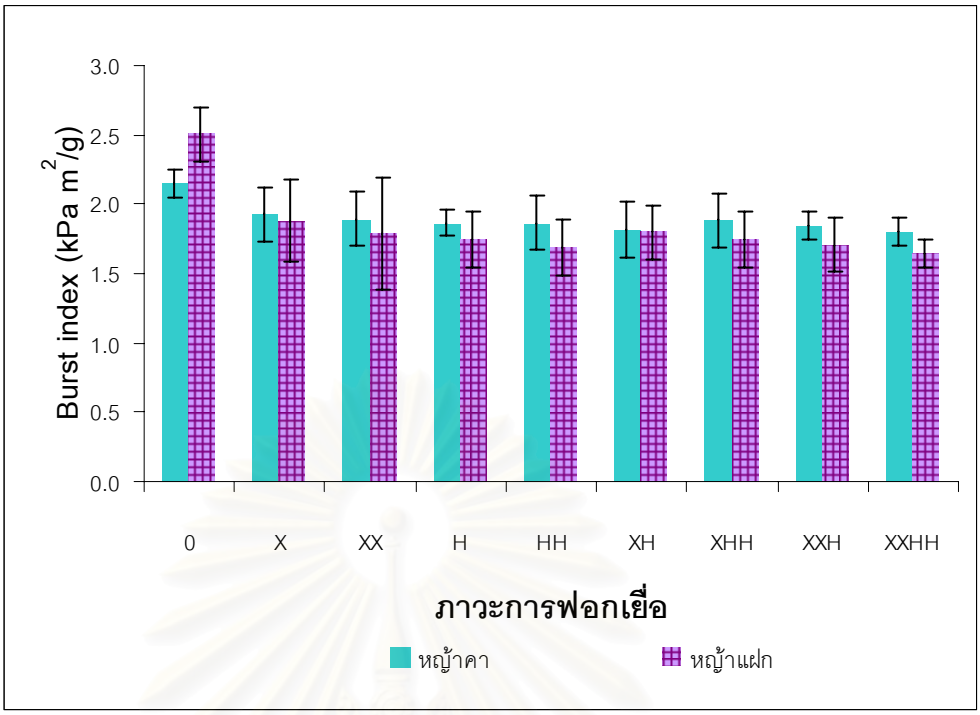
ภาวะการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงสุด คือ ภาวะที่ใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำสุด นั่นคือ เมื่อใช้เอนไซม์ไซแลนเนส 6.2 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกพบว่า แนวโน้มความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของหญ้าคาสูงกว่าหญ้าแฝกในทุกๆ ภาวะของการฟอกเยื่อ ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลจากค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.44 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)					
H_2O_2	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
(%)	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	2.143 ±0.1	1.927 ±0.2	1.895 ±0.2	2.504 ±0.2	1.822 ±0.3	1.791 ±0.4
5	1.867 ±0.1	1.883 ±0.2	1.802 ±0.2	1.747 ±0.2	1.796 ±0.2	1.708 ±0.2
10	1.815 ±0.2	1.849 ±0.1	1.776 ±0.1	1.688 ±0.2	1.750 ±0.2	1.647 ±0.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**หมายเหตุ 0= ไม่ฟอก, X=6.2 IU/g, XX= 18.6 IU/g, H=5%H_2O_2, HH=10%H_2O_2, XH=6.2 IU/g + 5%H_2O_2, XHH=6.2 IU/g +10%H_2O_2, XXH=18.6 IU/g + 5%H_2O_2 และ XXHH=18.6 IU/g+10%H_2O_2

ภาพที่ 4.22 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

4.5.6 ความต้านทานแรงฉีก

จากตารางที่ 4.45 และภาพที่ 4.23 แสดงค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก และแนวโน้มความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนของเอนไซม์ไซแลนเนสกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจไปทำลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส โดยเส้นใยที่มีขนาดเล็กจะถูกทำปฏิกิริยาก่อน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้เยื่อในระบบเหลือปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ (Fines) น้อยลง ความยาวของเส้นใยในระบบมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและความแข็งแรงของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น

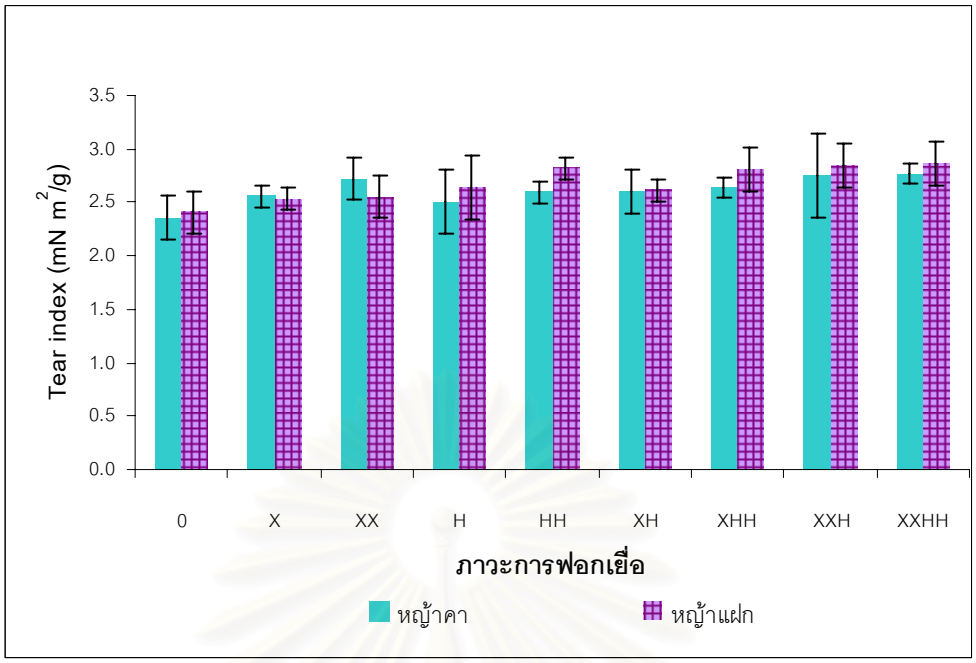
ภาวะการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ให้ความต้านทานแรงฉีกสูงสุด คือ ภาวะที่ใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงสุด นั่นคือ เมื่อใช้เอนไซม์ไซแลนเนส 18.6 IU/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งเป็นภาวะที่ตรงกันข้ามกับความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก พบว่า แนวโน้มความต้านทานแรงฉีกของหญ้าแฝกสูงกว่าหญ้าคาในทุกๆ ภาวะของการฟอกเยื่อ ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มตรงข้ามกับผลจากค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ตารางที่ 4.45 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก(mN m^2/g)					
H_2O_2	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
(%)	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	2.358 ±0.2	2.557 ±0.1	2.719 ±0.2	2.410 ±0.2	2.533 ±0.1	2.554 ±0.2
5	2.508 ±0.3	2.600 ±0.1	2.752 ±0.2	2.647 ±0.3	2.615 ±0.1	2.844 ±0.1
10	2.596 ±0.1	2.637 ±0.4	2.772 ±0.1	2.817 ±0.2	2.807 ±0.2	2.865 ±0.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**หมายเหตุ 0= ไม่ฟอก, X=6.2 IU/g, XX= 18.6 IU/g, H=5%H_2O_2, HH=10%H_2O_2, XH=6.2 IU/g + 5%H_2O_2, XHH=6.2 IU/g +10%H_2O_2, XXH=18.6 IU/g + 5%H_2O_2 และ XXHH=18.6 IU/g+10%H_2O_2

ภาพที่ 4.23 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก

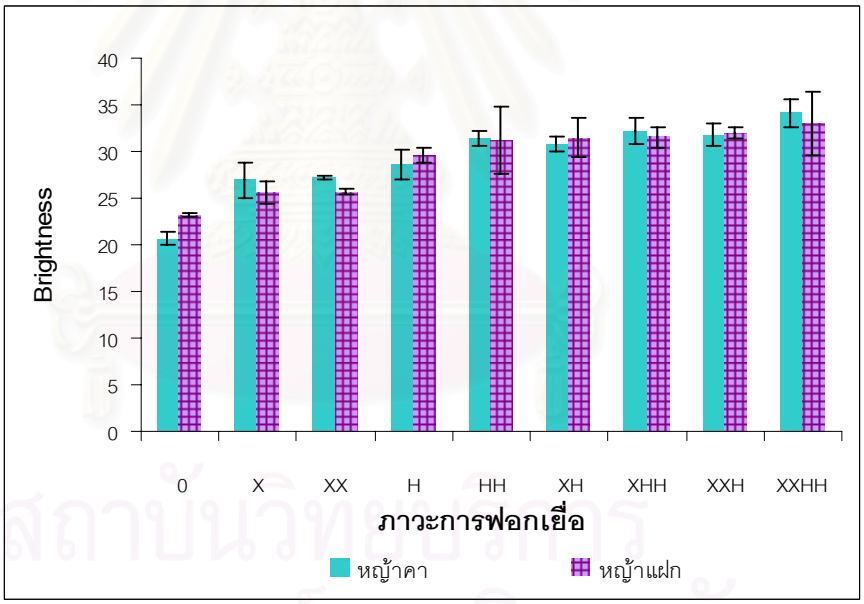
4.5.7 ค่าความขาวสว่าง

จากตารางที่ 4.46 และภาพที่ 4.24 แสดงค่าความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก หรือเยื่อที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวหรือทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ไซแลนเนสเพียงอย่างเดียว และแนวโน้มความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนของเอนไซม์ไซแลนเนสกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเอนไซม์ไซแลนเนสไปช่วยเปิดผิวของเส้นใย โดยไปทำปฏิกิริยากับไซแลนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเฮมิเซลลูโลส รวมถึงช่วยไปตัดสายโซ่ของสารประกอบคาร์บอไฮเดรตกับลิกนินที่เรียกว่า Lignin-carbohydrate complex ตรงตำแหน่งไซแลน ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ได้จึงยิ่งสูงขึ้นกว่าการใช้สารฟอกเยื่อตัวใดตัวหนึ่งเพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้ยังพบว่าความขาวสว่างของกระดาษที่ได้จากเยื่อของหญ้าคาและเยื่อของหญ้าแฝกมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในทุกภาวะของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 4.46 ค่าความขาวสว่างของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ค่าความขาวสว่าง					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	20.63 ±0.7	26.92 ±1.9	27.14 ±0.2	23.12 ±0.2	25.60 ±1.2	25.69 ±0.3
5	28.63 ±1.6	30.78 ±0.8	31.75 ±1.4	29.58 ±0.8	31.44 ±2.1	32.09 ±0.6
10	31.46 ±0.8	32.28 ±1.2	34.15 ±1.5	31.24 ±3.6	31.59 ±1.1	33.00 ±3.4



**หมายเหตุ 0= ไม่ฟอก, X=6.2 IU/g, XX= 18.6 IU/g, H=5%H_2O_2, HH=10%H_2O_2, XH=6.2 IU/g + 5%H_2O_2, XHH=6.2 IU/g +10%H_2O_2, XXH=18.6 IU/g + 5%H_2O_2 และ XXHH=18.6 IU/g+10%H_2O_2

ภาพที่ 4.24 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษ

4.5.8 ค่าความทึบแสง

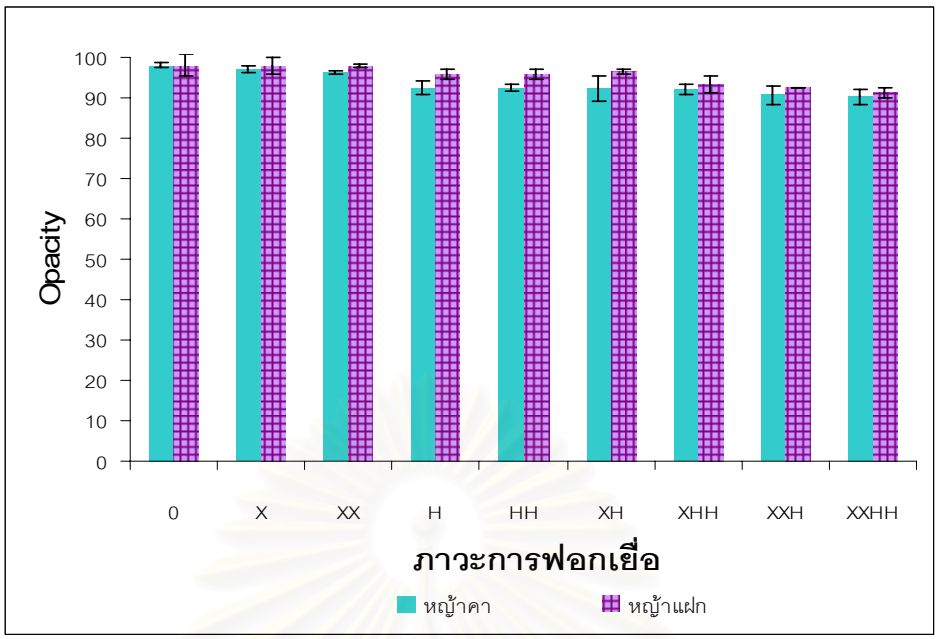
จากตารางที่ 4.47 และภาพที่ 4.25 แสดงค่าความทึบแสงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มค่าความทึบแสงของกระดาษมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจาก เอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจไปทำลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสโดยเส้นใยที่มีขนาดเล็กจะถูกทำปฏิกิริยาก่อนเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้เยื่อในระบบเหลือปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ (Fines) น้อยลง ความยาวของเส้นใยในระบบมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวของเส้นใยในการกระเจิงแสงมีน้อยลง ความทึบแสงจึงน้อยลง

นอกจากนี้ยังพบว่าความทึบแสงของกระดาษที่ได้จากเยื่อของหญ้าคาและเยื่อของหญ้าแฝกมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในทุกภาวะของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 4.47 ค่าความทึบแสงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ กัน

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ค่าความทึบแสง					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g	0 IU/g	6.2 IU/g	18.6 IU/g
0	98.00 ±0.6	97.70 ±0.8	96.37 ±0.5	98.04 ±2.6	97.91 ±2.0	97.83 ±0.3
5	92.51 ±1.5	92.34 ±3.1	90.70 ±1.3	95.85 ±1.2	96.58 ±0.6	92.45 ±0.1
10	92.45 ±0.9	92.13 ±2.4	90.24 ±1.7	95.79 ±1.4	93.33 ±1.9	91.24 ±1.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**หมายเหตุ 0= ไม่ฟอก, X=6.2 IU/g, XX= 18.6 IU/g, H=5%H_2O_2, HH=10%H_2O_2, XH=6.2 IU/g + 5%H_2O_2, XHH=6.2 IU/g +10%H_2O_2, XXH=18.6 IU/g + 5%H_2O_2 และ XXHH=18.6 IU/g+10%H_2O_2

ภาพที่ 4.25 ผลของการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.48 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าคา

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	A			B			A* B		
	P-value	Fcall	Fcrit	P-value	Fcall	Fcrit	P-value	Fcall	Fcrit
- ปริมาณผลผลิต	1.38E-07*	145.9981	4.256495	2.76E-06*	72.86885	4.256495	0.518964	0.867883	3.633089
- สภาพระบายได้	7.16E-06*	58.09727	4.256495	0.000238*	24.23784	4.256495	0.341438	1.296136	3.633089
- ความหนาแน่น	0.068991	3.651904	4.256495	0.136239	2.507932	4.256495	0.056477	3.458116	3.633089
- ความเรียบ	0.310862	1.334118	4.256495	0.054595	4.087059	4.256495	0.007875*	6.924706	3.633089
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	4.46E-06*	65.03122	4.256495	0.001388*	14.94386	4.256495	0.00136*	21.09256	3.633089
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	4.26E-05*	846.132	4.256495	2.57E-09*	360.4572	4.256495	1.8E-08*	170.3007	3.633089
- ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	0.106881	2.896261	4.256495	0.062004	3.847633	4.256495	0.809363	0.392255	3.633089
- ความขาวสว่าง	2.31E-06*	76.01852	4.256495	0.00042*	20.8079	4.256495	0.025706*	4.671336	3.633089
- ความทึบแสง	0.000254*	23.81235	4.256495	0.151725	2.342269	4.256495	0.998896	0.021702	3.633089

หมายเหตุ: A คือ ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (0, 6.2 และ 18.6 IU/g โดยเป็นกรัมของน้ำหนักเยื่อแห้ง) B คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (0%, 5% และ 10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) และ A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ โดยในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลต่อชนิดต่างๆ ขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อชนิดขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่า F ที่ได้จากตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

เนื่องจากการทดลองศึกษาถึงปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (A) และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก เป็นการทดลองที่มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้สามารถพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแประหว่างตัวแปร (A*B) ได้

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.48 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (A) และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าคา พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ของเยื่อ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษ ในขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ของเยื่อ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความขาวสว่างของกระดาษ ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความเรียบของกระดาษ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความขาวสว่างของกระดาษ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีค่า F คำนวณมากกว่าค่า F จากตาราง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.49 ผลการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าแฝก

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	A			B			A* B		
	P-value	Fcall	Fcrit	P-value	Fcall	Fcrit	P-value	Fcall	Fcrit
- ปริมาณผลผลิต	4.81E-08*	185.7445	4.256495	3.66E-07*	116.7759	4.256495	0.126728	2.39968	3.633089
- สภาพระบายได้	4.26E-05*	37.61127	4.256495	0.00583*	19.05171	4.256495	0.948923	0.168797	3.633089
- ความหนาแน่น	0.001361*	15.00495	4.256495	0.027686*	5.485637	4.256495	0.181354	1.980043	3.633089
- ความเรียบ	0.008237*	8.572917	4.256495	1.17E-05*	51.64323	4.256495	0.008582*	6.740885	3.633089
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.01794*	6.496503	4.256495	0.407098	0.994725	4.256495	0.956387	0.169913	3.633089
- ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	2.21E-08*	221.6091	4.256495	1.65E-06*	82.22293	4.256495	9.39E-07*	69.1331	3.633089
- ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	0.007018*	9.046484	4.256495	0.017741*	6.523753	4.256495	0.956387	0.153952	3.633089
- ความขาวสว่าง	0.000219*	24.7798	4.256495	0.163522	2.229355	4.256495	0.94938	0.167909	3.633089
- ความทึบแสง	0.009568*	8.145143	4.256495	0.089428	3.195178	4.256495	0.439186	1.03778	3.633089

หมายเหตุ: A คือ ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (0, 6.2 และ 18.6 IU/g โดยเป็นกรัมของน้ำหนักเยื่อแห้ง) B คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (0%, 5% และ 10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) และ A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.49 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (A) และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากหญ้าแฝก พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อ

ปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ ความหนาแน่นและความเรียบของกระดาษ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความต้านทานแรงฉีก ความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษ ส่วนปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิต สภาพระบายได้ ความหนาแน่นและความเรียบของกระดาษ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และดัชนีความต้านทานแรงฉีก ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความเรียบของกระดาษ และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีค่า F คำนวณมากกว่าค่า F จากตาราง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตเยื่อจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

เมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณผลผลิตที่ได้กลับลดลง ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากใช้ความเข้มข้นของของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อมากจนเกินไปกลับส่งผลให้แนวโน้มของความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษลดลง เมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ความทึบแสงของกระดาษกลับมีแนวโน้มลดลง

ความเข้มข้นของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกจะอยู่ในช่วง 10.0% -12.5% โดยความเข้มข้นของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกที่เหมาะสมที่สุดคือ 10.0%

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ทั้งหญ้าคาและหญ้าแฝกสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษได้ โดยหญ้าคาจะมีลักษณะที่เหมาะกับการนำมาผลิตเยื่อมากกว่าหญ้าแฝก เนื่องจากให้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่สูงกว่า กระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าคามีความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากกว่า รวมถึงมีความขาวสว่างและความทึบแสงสูงกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากหญ้าแฝก

5.1.2 ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ต่อการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

การฟอกเยื่อโดยใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นหรือใช้เวลาในการฟอกนานขึ้นส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความทึบแสงมีแนวโน้มลดลง หากแต่ทำให้ความหนาแน่นของแผ่นกระดาษ ความต้านทานแรงฉีก และ

ความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการทดลองเบื้องต้นสรุปได้ว่า ภาวะของการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับ 5% และ 10% และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ 60 นาที เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณผลผลิตของเยื่อหลังฟอกมากที่สุดและค่าความแข็งแรงของกระดาษลดลงไปไม่มากนักเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของกระดาษก่อนการฟอก นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มสูงกว่ากระดาษจากหญ้าแฝก

5.1.3 ผลของเอนไซม์ไซแลนเนสต่อการฟอกเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

จากการทดลองพบว่า กระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับ 6.2 IU/g, 18.6 IU/g และ 31.0 IU/g มีแนวโน้มของปริมาณผลผลิตเยื่อและค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับสูงขึ้น ส่วนค่าความขาวสว่างของกระดาษมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสพบว่า กระดาษจากหญ้าคามีแนวโน้มความแข็งแรงมากกว่ากระดาษจากหญ้าแฝกในทุกๆ ความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอก

จากผลการทดลองเบื้องต้นสรุปได้ว่า การฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ความเข้มข้น 6.2 IU/g และ 18.6 IU/g เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ใกล้เคียงกันและแนวโน้มของปริมาณผลผลิตเยื่อและค่าความแข็งแรงของกระดาษลดลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนการฟอก

5.1.4 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลทำให้ปริมาณผลผลิตเยื่อลดลง โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการลดลงของผลผลิตของเยื่อมากกว่าเอนไซม์ไซแลนเนส และเมื่อมีการใช้ปริมาณของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น ปริมาณผลผลิตของเยื่อก็ยิ่งลดลงมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าสภาพระบายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก และความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่ผลการทดลองที่ได้จากค่าความต้านทานแรงฉีกกลับให้ผลตรงกันข้าม กล่าวคือ การใช้เอนซ์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นกลับทำให้ความต้านทานแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ค่าความทึบแสงของกระดาษกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของหญ้าคาและหญ้าแฝกพบว่า หญ้าคาให้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่สูงกว่าหญ้าแฝกในทุกๆ ภาวะของการฟอกเยื่อ กระดาษจากหญ้าคามีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงกว่าหญ้าแฝก แต่มีค่าความต้านทานแรงฉีกต่ำกว่าหญ้าแฝก ในขณะที่ค่าความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษจากทั้งหญ้าคาและหญ้าแฝกมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าเส้นใยจากหญ้าคามีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเยื่อและกระดาษมากกว่าเส้นใยจากหญ้าแฝก เนื่องจากหญ้าคาให้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้สูงกว่า และกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคายังมีความแข็งแรงมากกว่ากระดาษจากหญ้าแฝก ในส่วนของการฟอกเยื่อนั้นพบว่า การฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มความขาวสว่างของกระดาษมากกว่าการฟอกด้วยสารฟอกเยื่อชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้เยื่อที่ได้จากการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลับให้ค่าความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ข้อควรระวังก็คือการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้ความแข็งแรงของกระดาษในแง่ของความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลง

5.2 **ข้อเสนอแนะ**

ในการทดลองควรมีการวิเคราะห์การกระจายตัวของความยาวของเส้นใย สัดส่วนปริมาณของเส้นใยในช่วงความยาวต่างๆ หลังการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส การฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อที่จะได้ทราบถึงอิทธิพลของสารฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติดังกล่าวซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อความแข็งแรงของกระดาษ

รายการอ้างอิง

[1] Non-wood [online]. (n.d.). Available form:

http://www.fao.org/docrep/w7990e/w7990e08 htm [2008, June16]

[2] Bierman, C. J. Essentials of Pulping and Papermaking. UK: Acadamic Press, 1993.

[3] Softwood fiber [online]. (n.d.). Available form:

http://www.paperonweb.com/dict11.htm#s [2009, January 24]

[4] Grass [online]. (n.d.). Available form:

http://en.wikipedia.org/wiki/Grass [2008, June 24]

[5] สุรชัย มัจฉาชีพ. วัชพืชในประเทศไทย.กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แพร่พิทยา, 2538

[6] Cogon grass [online]. (n.d.). Available form:

http://www.invasive.org/eastern/biocontrol/28CogonGrass.htm l[2008, June 24]

[7] ประโยชน์ของหญ้าคา [online]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา:

http://www.skn.ac.th/skl/project/eathel97/plant21.htm [23 กรกฎาคม 2551]

[8] หญ้าแฝก [online]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา:

http://www.chaipat.or.th/chaipat/journal/dec00/thai/t_vetiver.html

[24 มีนาคม 2551]

[9] Fiber internal structure [online]. (n.d.). Available form:

http://www.paperonweb.com/dict11.htm#f [2009, February 21]

[10] Sjöström, E. Wod Chemistry Fundamentals and Applications. USA :

Acadimic Press,1993.

[11] Fiber chemisty [online]. (n.d.). Available form: http://www.nature.com/nrg/journal/v9/n6/fig_tab/nrg2336_F1.htm [2009, February 21]

[12] Cellulose structure [online]. (n.d.). Available form: http://www.paperonweb.com/dict11.htm#c [2009, February 21]

[13] Hemicellulose structure [online]. (n.d.). Available form: http://www.paperonweb.com/dict11.htm#c [2009, February 21]

[14] Lignin structure [online]. (n.d.). Available form: http://www.palaeos.com/Plants/Lists/Glossary/GlossaryL.html [2009, February 21]

[15] Casey, J.P. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Tenology. 3rd ed. USA : Wiley– Interscience,1980.

[16] Kenneth W. Britt. Handbook of Pulp and Paper Technology. 2nd ed.USA,1984

[17] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper Technologists. 2nd ed. Canada : Angus Wilde Publications,1992.

[18] Fourdrinier machine [online]. (n.d.). Available form: http://www.energysolutionscenter.org/GasIRPaper/Learn%20About/Paper_Manufacture.htm#PaperMachines [2009, February 21]

[19] Xylan structure [online]. (n.d.). Available form: http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html [2009, February 21]

[20] Xylanase enzyme [online]. (n.d.). Available form: http://www.sigmaaldrich.com/life-science/metabolomics/enzyme-

explorer/learning-center/carbohydrate-analysis/carbohydrate-analysis-ii.html#Xylanase [2009, February 21]

[21] Jahan, M.S., Islam, M.K., Chowdhury, D.A.N., Moeiz, S.M.I., and Armanb, U. Pulp and Papermaking Properties of Pati (Typha). Industrial Crops and Products. 26 (2007):259 - 267.

[22] Manji, A.H. Extended Usage of Xylanase Enzyme to Enhance the Bleaching of Softwood Kraft Pulp. TAPPI Journal. 5,1 (2006):23-26.

[23] Prasad, D.Y., Rao, N.R.M., Rajesh, K.S., and Praburaj, T.T. Enzymes Improve the Bleachability of Bagasse Mechanical Pulp. TAPPI Journal. 79, 8 (1996):133-138.

[24] 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.

[25] Bajpai, P., and Bajpai, P.K. Application of Xylanases in Prebleaching of Bamboo Kraft Pulp.TAPPI Journal. 79, 4 (1996): 225-230.

[26] Deaeault, C., Leduc, C and Valade, J.L. The use of Xylanases in Kraft Pulp bleaching: a review. TAPPI Journal. 77, 6 (1994): 125-131.

[27] บังอรศิริ อินตรา. การผลิตไซแลนเนสจาก *Aureobasidium pullulans* ที่คัดแยกได้ในประเทศไทยเพื่อใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษ.โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การเตรียมเยื่อและสารเคมี

การคำนวณหาน้ำหนักเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

ตัวอย่าง

กำหนดให้ เยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝกมีความชื้นร้อยละ 15.6

ดังนั้น เยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝกมีส่วนที่เป็นน้ำหนักเยื่อจริง คือ 84.4 กรัม (จากน้ำหนักเยื่อทั้งหมด 100 กรัม)

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อที่แท้จริงของหญ้าคาหรือหญ้าแฝก 250 กรัม

$\therefore$ จะต้องชั่งเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝก $\frac{250 \times 100}{84.4}$

$= 296.21$ กรัม

ดังนั้น จะต้องชั่งเยื่อ 296.21 กรัม เพื่อให้ได้เยื่อที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 250 กรัม

การคำนวณหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝก

ตัวอย่าง

กำหนดให้ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเท่ากับร้อยละ 5

แสดงว่า เยื่อน้ำหนัก 100 กรัม จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 กรัม

ดังนั้น เยื่อที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 250 กรัม

$\therefore$ จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ $\frac{250 \times 5}{100}$

$= 12.5$ กรัม

ดังนั้น จะต้องชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12.5 กรัม เพื่อใช้กับเยื่อที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 250 กรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาผลผลิตของเยื่อ (% Yield)

ตัวอย่าง

กำหนดให้ น้ำหนักเยื่อแห้งก่อนต้มเท่ากับ 250 กรัม และน้ำหนักเยื่อแห้งหลังต้มเท่ากับ 73.2 กรัม ดังนั้น

$$\text{จากสูตร \% Yield} = \frac{\text{o.d. weight ก่อนต้ม - o.d. weight หลังต้ม}}{\text{o.d. weight ก่อนต้ม}} \times 100$$

$$= \frac{250 - 73.2}{250} \times 100$$

$$= 70.72\%$$

$\therefore$ น้ำหนักแห้ง 100 กรัม จะได้ผลผลิตเยื่อ 70.72

ถ้าน้ำหนักแห้ง 250 กรัม จะได้ผลผลิตเยื่อ $= \frac{250 \times 70.72}{100}$

$= 176.8$ กรัม

ดังนั้น น้ำหนักเยื่อหลังจากการต้มเท่ากับ 176.8 กรัม

การคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าการระบายน้ำ

1. หาความเข้มข้น (% consistency) ของเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝกที่ได้จากการบด ดังนี้

$$\text{\% consistency} = \frac{\text{o.d. weight}}{\text{water + o.d. weight}} \times 100$$

$$= \frac{250 \text{ กรัม}}{23000 \text{ กรัม} + 250 \text{ กรัม}} \times 100$$

$$= 1.08\%$$

ดังนั้น เยื่อที่อยู่ในเครื่องบดเยื่อมีค่า% consistency เท่ากับร้อยละ1.08

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. หาปริมาตรของน้ำเยื่อจากเครื่องบดเยื่อเพื่อนำมาทดสอบหาค่าการระบายน้ำ โดยกำหนดให้น้ำเยื่อมี % consistency เท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ดังนี้

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$0.3 \times 1000 \text{ มิลลิลิตร} = 1.08 \times V_2$$

$$V_2 = 227.78 \sim 228$$

ดังนั้น ต้องตักน้ำเยื่อจากเครื่องบดเยื่อประมาณ 228 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร จากนั้นจึงนำไปทดสอบค่าการระบายน้ำของเยื่อ

การคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่นกระดาษ

กำหนดให้กระดาษมีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และความเข้มข้น (% consistency) เท่ากับร้อยละ 0.3

1. หาน้ำหนักกระดาษแห้ง (o.d weight)

จากกระดาษมีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ดังนั้น

$$\text{พื้นที่วงกลม} = \pi r^2$$

$$= (3.14)(0.2/2)^2$$

$$= 0.0314 \text{ ตารางเมตร}$$

ถ้าพื้นที่ 1 ตารางเมตร มีน้ำหนักเท่ากับ 60 กรัม

$\therefore$ พื้นที่ 0.0314 ตารางเมตร จะมีน้ำหนัก $0.0314 \times 60 = 1.88$ กรัม

ดังนั้น กระดาษ 1 แผ่น จะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.88 กรัม

2. หาน้ำหนักเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝกที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ

จาก % consistency ของเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝก ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.08

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

$$1.08\% = \frac{\text{1.88 กรัม}}{\text{water + o.d. weight}} \times 100$$

$$\text{water + o.d. weight} = 174.07 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น จะต้องชั่งน้ำเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝกเท่ากับ 174.07 กรัม ในการขึ้นแผ่นกระดาษจำนวน 1 แผ่น

จากนั้นปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อนำไปขึ้นแผ่นกระดาษ

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$1.08 \times 174.07 = 0.3 \times V_2$$

$$V_2 = 626.66$$

$\therefore$ ต้องเติมน้ำเท่ากับ 626.66 - 174.07 = 452.59 มิลลิลิตร และน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ 1 แผ่น เท่ากับ 626.66 มิลลิลิตร

การคำนวณหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝก

<u>ตัวอย่าง</u>

กำหนดให้ ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อเท่ากับร้อยละ 10

แสดงว่า เยื่อน้ำหนัก 100 กรัม จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 มิลลิลิตร

ดังนั้น เยื่อที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 250 กรัม

$\therefore$ จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ $\frac{250 \times 10}{100}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= \text{ 25 มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น จะต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 25 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการฟอกเยื่อที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 250 กรัม

การคำนวณการปรับความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อหญ้าคาหรือหญ้าแฝก

1. การปรับความเข้มข้นของเอนไซม์

<u>ตัวอย่าง</u>

กำหนดให้ ร้อยละ 100 ของเอนไซม์ไซแลนเนส เท่ากับ 5 กรัม

ถ้าต้องการปรับความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสให้เท่ากับร้อยละ 1

$$\therefore \text{ จะต้องใช้เอนไซม์ไซแลนเนส } \frac{1 \times 5}{100}$$

$$= \text{ 0.05 กรัม}$$

ดังนั้น จะต้องใช้เอนไซม์ไซแลนเนส 0.05 กรัม เพื่อปรับความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสให้เท่ากับร้อยละ 1

2. ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

จากปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในการฟอกเยื่อเท่ากับร้อยละ 1 เท่ากับ 0.05 กรัม

แสดงว่า เยื่อน้ำหนัก 100 กรัม จะใช้เอนไซม์ไซแลนเนสเท่ากับ 0.05 กรัม

ดังนั้น เยื่อที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 250 กรัม

$$\therefore \text{ จะใช้เอนไซม์ไซแลนเนส } \frac{250 \times 0.05}{100}$$

$$= \text{ 0.13 กรัม}$$

ดังนั้น จะต้องใช้เอนไซม์ไซแลนเนส 0.13 กรัม เพื่อใช้ในการฟอกเยื่อที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 250 กรัม

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ปริมาณผลผลิต (Yield) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

ชนิดวัชพืช		ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้ (%)			
	ครั้งที่	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
หญ้าคา	1	70.02	68.40	67.28	65.53
	2	81.11	78.40	76.18	73.96
	เฉลี่ย	75.57	73.40	71.73	69.75
หญ้าแฝก	1	50.88	48.91	48.12	46.88
	2	61.94	57.98	54.90	50.69
	เฉลี่ย	56.41	53.02	51.51	48.79

ตารางที่ ข.2 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝก

ชนิดวัชพืช		ค่าสภาพระบายได้ (CSF, mL)			
	ครั้งที่	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
หญ้าคา	1	389	386	338	330
	2	365	354	296	278
	เฉลี่ย	377	370	317	304
หญ้าแฝก	1	360	348	338	333
	2	311	274	245	227
	เฉลี่ย	336	311	292	280

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ครั้งที่	ความหนาแน่น (g/cm^3)							
	หญ้าคา				หญ้าแฝก			
	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
1	0.647	0.616	0.634	0.609	0.683	0.692	0.654	0.658
2	0.690	0.667	0.668	0.645	0.788	0.748	0.740	0.757
เฉลี่ย	0.669	0.641	0.651	0.627	0.731	0.720	0.697	0.708

ตารางที่ ข.4 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ครั้งที่	ความเรียบ (Sec)							
	หญ้าคา				หญ้าแฝก			
	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
1	7.5	11.6	12.9	16.5	10.4	12.2	13.1	15.9
2	7.9	12.7	13.0	16.8	10.0	13.1	15.6	18.9
เฉลี่ย	7.7	12.2	13.0	16.7	10.2	12.7	14.4	17.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ครั้งที่	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)							
		หญ้าคา				หญ้าแฝก			
		7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
1	1	61.87	72.57	74.70	62.52	46.76	49.50	47.07	44.27
	2	66.85	74.54	72.24	62.69	46.73	48.18	50.10	44.27
	3	70.00	73.15	71.17	57.78	45.96	48.70	49.07	46.42
	4	60.24	71.62	72.20	64.77	47.28	52.33	49.28	45,50
	5	66.34	71.26	73.70	64.12	49.35	51.15	45.67	44.47
	เฉลี่ย	66.28	72.59	71.71	62.45	47.23	50.02	48.21	44.99
2	1	56.69	62.26	65.70	56.53	51.64	60.47	60.58	54.80
	2	56.08	66,63	63.75	61.04	51.36	60.94	61.70	55.94
	3	54.90	65.99	61.71	57.84	54.68	61.30	57.16	57.08
	4	60.17	63.11	59.74	56.47	54.31	65.91	58.14	54.57
	5	57.39	63.21	61.22	59.36	57.14	60.02	59.16	55.44
	เฉลี่ย	57.06	64.19	62.38	58.25	53.84	61.69	59.33	55.56
ค่าเฉลี่ย		**61.67**	**68.39**	**67.55**	**60.35**	**50.54**	**55.86**	**53.77**	**50.28**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.6 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ครั้งที่	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)							
		หญ้าคา				หญ้าแฝก			
		7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
1	1	1.968	2.706	2.781	2.659	1.679	1.976	2.016	1.730
	2	2.585	2.888	2.698	2.498	1.768	2.254	2.071	1.804
	3	2.574	2.863	2.822	2.556	1.775	2.317	1.953	2.183
	4	2.502	2.914	2.547	2.663	1.525	2.238	2.242	1.820
	5	2.502	2.242	2.687	2.384	1.785	1.810	1.944	2.140
	เฉลี่ย	2.426	2.723	2.707	2.553	1.706	2.119	2.045	1.936
2	1	2.066	2.376	2.340	2.122	1.867	2.249	2.314	2.114
	2	1.963	2.589	2.159	2.174	1.772	2.078	2.071	2.016
	3	2.083	2.650	2.275	1.960	1.866	2.269	2.182	2.061
	4	1.986	2.219	2.127	2.085	1.776	2.493	2.351	1.965
	5	2.166	2.563	2.238	2.001	1.811	2.403	2.459	1.921
	เฉลี่ย	2.053	2.479	2.228	2.068	1.832	2.299	2.276	2.015
ค่าเฉลี่ย		**2.311**	**2.601**	**2.468**	**2.240**	**1.976**	**2.209**	**2.161**	**1.769**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.7 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากหญ้าคาและหญ้าแฝก

ครั้งที่	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก(mN m^2/g)							
		หญ้าคา				หญ้าแฝก			
		7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH	7.5% NaOH	10.0% NaOH	12.5% NaOH	15.0% NaOH
1	1	1.379	1.509	1.579	1.612	1.028	1.284	1.235	1.249
	2	1.360	1.447	1.570	1.502	1.132	1.329	1.304	1.544
	3	1.584	1.383	1.595	1.423	1.047	1.432	1.229	1.384
	4	1.663	1.444	1.578	1.770	1.094	1.399	1.289	1.276
	5	1.376	1.482	1.621	1.644	1.053	1.701	1.367	1.396
	เฉลี่ย	1.473	1.453	1.589	1.590	1.071	1.429	1.285	1.370
2	1	1.186	1.744	1.756	1.493	1.808	1.497	1.769	1.429
	2	0.118	1.801	1.948	1.556	1.289	1.521	1.526	1.390
	3	1.215	1.709	1.750	1.513	1.180	1.574	1.633	1.509
	4	1.211	1.780	1.731	1.642	1.190	1.382	1.796	1.469
	5	1.205	1.566	1.722	1.600	1.101	1.456	1.700	1.545
	เฉลี่ย	0.996	1.719	1.780	1.562	1.256	1.486	1.685	1.469
ค่าเฉลี่ย		**1.463**	**1.356**	**1.685**	**1.578**	**1.114**	**1.460**	**1.486**	**1.420**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.8 ปริมาณผลผลิต (Yield) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		60 นาที	90 นาที	120 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
5.0	1	81.27	78.36	70.45	80.93	72.70	62.24
	2	84.99	83.58	76.03	82.77	77.50	68.24
	เฉลี่ย	83.13	80.97	73.27	81.85	75.10	65.60
10.0	1	77.92	75.01	68.59	69.35	63.45	55.91
	2	83.12	81.41	71.41	70.25	64.74	61.03
	เฉลี่ย	80.52	78.21	70.00	69.80	64.14	58.47

ตารางที่ ข.9 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ค่าสภาพระบายได้ (CSF, mL)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		60 นาที	90 นาที	120 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
5.0	1	384	398	416	399	437	441
	2	400	402	426	425	441	465
	เฉลี่ย	392	400	421	412	439	453
10.0	1	415	417	418	409	437	462
	2	419	433	474	459	469	478
	เฉลี่ย	417	425	446	434	453	470

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.10 ความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ความหนาแน่น (g/cm^3)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		60 นาที	90 นาที	120 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
5.0	1	0.540	0.537	0.549	0.593	0.624	0.668
	2	0.540	0.551	0.551	0.613	0.630	0.672
	เฉลี่ย	0.540	0.544	0.550	0.603	0.627	0.670
10.0	1	0.523	0.540	0.523	0.618	0.632	0.740
	2	0.531	0.544	0.531	0.630	0.664	0.798
	เฉลี่ย	0.527	0.542	0.546	0.624	0.648	0.769

ตารางที่ ข.11 ความเรียบของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ความเรียบ (Sec)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		60 นาที	90 นาที	120 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
5.0	1	4.8	4.9	8.0	11.3	16.3	17.6
	2	5.2	6.3	8.6	13.1	17.1	18.0
	เฉลี่ย	5.0	5.6	8.3	12.2	16.7	17.8
10.0	1	5.1	5.3	7.6	10.3	17.7	22.6
	2	5.3	6.3	8.0	11.9	16.1	23.0
	เฉลี่ย	5.2	5.8	7.8	11.1	16.9	22.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.12 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		60 นาที	90 นาที	120 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
5.0	1	40.08	37.93	39.19	35.48	35.48	33.23
	2	38.19	37.36	37.17	32.74	32.74	31.18
	3	32.18	32.01	32.18	35.97	34.45	34.45
	4	35.90	35.72	34.47	30.72	29.75	29.60
	5	37.70	38.09	33.90	30.57	29.64	29.19
	เฉลี่ย	36.76	36.22	35.29	33.05	32.34	31.50
10.0	1	32.66	36.17	34.64	31.71	30.79	29.59
	2	36.46	40.81	32.77	29.06	27.91	27.14
	3	35.47	35.47	31.14	32.54	29.97	30.28
	4	32.41	29.70	27.28	31.21	29.03	29.64
	5	33.00	29.53	35.54	32.21	29.74	29.43
	เฉลี่ย	33.97	33.83	32.01	31.52	29.48	29.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.13 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		60 นาที	90 นาที	120 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
5.0	1	1.571	1.569	1.503	1.773	1.628	1.464
	2	1.701	1.544	1.456	1.696	1.518	1.534
	3	1.722	1.604	1.423	1.708	1.573	1.458
	4	1.786	1.612	1.461	1.661	1.493	1.463
	5	1.706	1.508	1.439	1.556	1.499	1.390
	เฉลี่ย	1.697	1.568	1.456	1.679	1.530	1.463
10.0	1	1.638	1.363	1.399	1.401	1.525	1.287
	2	1.507	1.420	1.285	1.292	1.588	1.323
	3	1.839	1.380	1.276	1.226	1.287	1.318
	4	1.523	1.370	1.284	1.528	1.243	1.258
	5	1.539	1.333	1.286	1.488	1.093	1.355
	เฉลี่ย	1.539	1.374	1.306	1.387	1.347	1.308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.14 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก(mN m^2/g)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		60 นาที	90 นาที	120 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
5.0	1	1.173	1.253	1.253	1.610	1.971	1.854
	2	1.130	1.186	1.186	1.557	1.799	1.810
	3	1.217	1.217	1.270	1.769	1.825	1.912
	4	1.247	1.253	1.294	1.851	1.854	1.820
	5	1.155	1.173	1.210	1.445	1.760	1.820
	เฉลี่ย	1.184	1.216	1.243	1.646	1.842	1.843
10.0	1	1.147	1.194	1.229	2.261	2.687	2.681
	2	1.128	1.160	1.208	2.247	2.426	2.437
	3	1.136	1.124	1.220	2.532	2.584	2.931
	4	1.080	1.058	1.166	2.488	2.619	2.819
	5	1.167	1.179	1.277	2.643	2.647	2.938
	เฉลี่ย	1.132	1.143	1.220	2.434	2.593	2.718

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.15 ปริมาณผลผลิต (Yield) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

ครั้งที่	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU
1	84.96	81.45	82.18	71.24	67.30	63.33
2	88.46	85.17	83.02	74.36	69.12	65.93
เฉลี่ย	86.71	83.31	82.61	72.80	68.21	64.63

ตารางที่ ข.16 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

ครั้งที่	ค่าสภาพระบายได้ (CSF, mL)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU
1	361	413	453	455	522	540
2	377	427	471	485	534	566
เฉลี่ย	369	420	462	470	528	553

ตารางที่ ข.17 ความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

ครั้งที่	ความหนาแน่น (g/cm^3)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU
1	0.593	0.641	0.647	0.603	0.628	0.637
2	0.627	0.671	0.667	0.697	0.694	0.651
เฉลี่ย	0.610	0.656	0.657	0.650	0.661	0.644

ตารางที่ ข.18 ความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

ครั้งที่	ความเรียบ (Sec)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU
1	7.9	9.1	10.6	9.3	10.9	11.1
2	9.3	10.3	11.4	9.7	11.7	11.9
เฉลี่ย	8.6	9.7	11.0	9.5	11.3	11.5

ตารางที่ ข.19 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)					
	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU
1	46.03	38.10	41.60	44.74	32.64	32.64
2	45.46	42.76	42.11	35.21	36.86	32.86
3	38.99	40.65	35.33	32.53	34.39	35.64
4	35.67	34.63	33.40	35.95	34.82	35.60
5	37.90	36.95	31.56	38.50	40.25	30.63
เฉลี่ย	40.61	38.62	36.44	36.93	35.84	33.48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.20 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)					
จำนวน	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
ตัวอย่าง	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU
1	1.779	1.876	1.745	1.759	1.586	1.421
2	2.184	1.907	1.691	1.639	1.539	1.342
3	2.262	1.897	2.178	1.622	1.822	1.477
4	1.744	1.818	2.063	1.845	1.671	1.431
5	1.893	1.893	1.690	1.907	1.688	1.838
เฉลี่ย	1.972	1.972	1.873	1.754	1.661	1.562

ตารางที่ ข.21 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

	ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีก(mN m^2/g)					
จำนวน	หญ้าคา			หญ้าแฝก		
ตัวอย่าง	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU	6.2 IU	18.6 IU	31.0 IU
1	3.079	2.411	2.704	2.093	2.227	2.420
2	2.405	2.555	2.675	2.488	2.516	2.692
3	2.504	2.933	3.389	2.313	2.360	2.397
4	1.924	2.548	3.227	2.459	2.576	2.530
5	2.041	2.983	2.737	2.399	2.467	2.635
เฉลี่ย	2.376	2.684	2.955	2.351	2.430	2.535

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.22 ปริมาณผลผลิต (Yield) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	100	88.42	86.61	100	78.31	75.09
	2	100	89.88	90.19	100	80.51	79.49
	เฉลี่ย	100	89.15	88.40	100	79.41	77.29
5	1	82.87	70.90	66.37	75.06	62.53	56.48
	2	87.13	73.10	69.23	76.86	63.07	61.32
	เฉลี่ย	85.00	72.00	69.05	75.42	62.80	58.90
10	1	78.64	68.88	62.86	73.96	58.99	51.48
	2	83.56	69.22	67.54	68.88	61.01	55.22
	เฉลี่ย	81.10	69.05	65.20	71.42	60.00	56.35

ตารางที่ ข.23 ค่าสภาพระบายได้(Freeness) ของเยื่อหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ค่าสภาพระบายได้ (CSF, mL)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	299	313	340	375	421	430
	2	313	327	356	381	437	452
	เฉลี่ย	306	320	348	378	429	441
5	1	366	403	437	449	483	521
	2	368	431	467	455	507	535
	เฉลี่ย	367	417	452	452	495	528
10	1	382	409	456	462	484	518
	2	394	441	506	482	540	560
	เฉลี่ย	388	425	481	472	512	539

ตารางที่ ข.24 ความหนาแน่นของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ความหนาแน่น (g/cm^3)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	0.615	0.518	0.602	0.735	0.651	0.683
	2	0.700	0.555	0.535	0.713	0.622	0.637
	เฉลี่ย	0.658	0.537	0.569	0.724	0.637	0.660
5	1	0.625	0.633	0.623	0.611	0.572	0.596
	2	0.602	0.687	0.637	0.609	0.599	0.639
	เฉลี่ย	0.614	0.660	0.630	0.610	0.586	0.616
10	1	0.609	0.571	0.569	0.628	0.593	0.605
	2	0.624	0.620	0.568	0.628	0.627	0.651
	เฉลี่ย	0.617	0.596	0.569	0.628	0.610	0.628

ตารางที่ ข.25 ความเรียบของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	ครั้งที่	ความเรียบ (Sec)					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	8.5	5.1	6.0	13.2	8.6	11.8
	2	6.8	5.0	5.0	12.7	8.8	11.9
	เฉลี่ย	7.7	5.1	5.5	13.0	8.7	11.9
5	1	6.0	6.2	6.7	12.8	10.3	13.0
	2	6.5	6.2	6.6	12.2	10.4	12.1
	เฉลี่ย	6.3	6.2	6.7	12.5	10.4	12.6
10	1	6.1	6.5	7.0	12.7	12.0	13.4
	2	6.3	6.4	6.8	12.1	11.0	12.4
	เฉลี่ย	6.2	6.5	6.9	12.4	11.5	12.9

ตารางที่ ข.26 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g) -การทดลองครั้งที่ 1					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	58.00	52.12	41.20	54.82	44.72	43.67
	2	63.47	50.27	46.68	61.06	44.95	35.45
	3	58.60	47.71	46.22	59.83	36.49	38.83
	4	54.48	49.01	50.90	55.46	43.32	38.00
	5	60.56	47.58	52.53	54.35	43.75	42.79
	เฉลี่ย	59.03	49.28	47.55	57.09	42.37	39.55
5	1	38.83	52.39	47.17	37.78	37.06	34.84
	2	48.55	49.45	48.18	36.67	40.35	35.70
	3	47.89	46.41	45.14	37.98	35.32	36.66
	4	48.28	49.88	42.37	37.50	40.25	35.05
	5	47.53	51.37	47.30	35.62	42.48	35.49
	เฉลี่ย	46.28	49.84	45.94	37.01	39.14	35.56
10	1	39.34	46.47	45.36	36.16	34.91	36.23
	2	44.46	46.01	44.21	37.54	34.84	35.61
	3	45.21	45.96	44.83	41.88	33.28	32.12
	4	47.55	51.28	44.91	35.62	42.59	33.11
	5	45.01	44.66	43.73	33.12	46.02	33.90
	เฉลี่ย	44.33	46.89	44.61	36.80	38.03	34.07

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g) -การทดลองครั้งที่ 2					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	51.27	53.10	50.12	54.62	42.83	41.44
	2	59.14	46.21	50.89	55.39	41.87	37.55
	3	57.31	49.90	50.71	55.21	38.05	43.76
	4	62.01	48.10	49.12	57.82	42.69	40.44
	5	61.82	50.41	45.08	55.36	41.49	36.66
	เฉลี่ย	58.43	49.32	48.99	55.70	41.24	39.85
5	1	42.56	47.62	47.59	40.16	35.97	34.69
	2	41.48	46.05	42.10	40.91	39.90	35.13
	3	44.29	50.08	43.10	40.31	37.97	35.24
	4	45.29	39.80	41.81	36.45	42.04	38.68
	5	47.87	53.91	40.70	37.05	34.81	37.53
	เฉลี่ย	44.54	47.43	43.14	38.96	38.13	36.22
10	1	40.07	47.80	45.94	33.81	37.95	31.14
	2	40.42	47.36	37.90	37.77	39.38	35.42
	3	39.92	47.60	42.83	41.57	36.66	35.24
	4	50.32	43.09	44.47	36.46	36.24	36.69
	5	40.53	46.80	43.49	39.13	39.62	35.84
	เฉลี่ย	42.43	46.46	42.87	37.88	37.94	34.91

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.27 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g) -การทดลองครั้งที่ 1					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	2.097	2.042	1.792	2.177	1.862	1.626
	2	2.118	1.988	1.709	2.143	1.799	1.734
	3	2.125	1.961	1.872	2.189	1.661	2.056
	4	2.144	1.810	1.973	1.996	1.894	1.734
	5	2.175	1.848	2.102	2.002	1.921	1.779
	เฉลี่ย	2.132	1.930	1.889	2.101	1.827	1.796
5	1	1.832	1.983	1.718	1.816	1.536	1.625
	2	1.956	1.811	1.812	1.702	1.806	1.736
	3	1.899	1.841	1.698	1.595	1.777	1.588
	4	1.855	1.866	1.728	1.752	1.899	1.786
	5	1.806	1.899	1.948	1.817	1.905	1.793
	เฉลี่ย	1.870	1.880	1.780	1.736	1.785	1.705
10	1	1.917	1.789	1.671	1.861	1.630	1.892
	2	1.897	1.871	1.738	1.673	1.650	1.620
	3	1.839	1.803	1.848	1.687	1.758	1.602
	4	1.772	1.917	1.807	1.620	1.709	1.659
	5	1.691	1.829	1.820	1.610	1.904	1.773
	เฉลี่ย	1.823	1.842	1.777	1.690	1.730	1.629

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g) -การทดลองครั้งที่ 2					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	2.100	2.054	1.856	2.144	1.845	1.617
	2	2.084	2.015	1.894	2.107	1.910	1.502
	3	2.106	1.701	1.928	2.194	1.528	1.998
	4	2.168	1.912	1.948	1.958	1.841	1.863
	5	2.311	1.931	1.875	2.157	1.962	1.944
	เฉลี่ย	2.154	1.923	1.900	2.112	1.817	1.785
5	1	1.897	1.983	1.718	1.965	1.832	1.689
	2	1.939	1.811	1.812	1.739	1.737	1.601
	3	1.930	1.841	1.698	1.762	1.751	1.783
	4	1.729	1.866	1.724	1.630	1.882	1.638
	5	1.820	1.899	1.948	1.696	1.831	1.886
	เฉลี่ย	1.863	1.880	1.780	1.758	1.831	1.710
10	1	2.037	1.789	1.671	1.500	1.714	1.633
	2	1.903	1.871	1.738	1.601	1.782	1.745
	3	1.747	1.803	1.848	1.701	1.675	1.714
	4	1.761	1.917	1.807	1.837	1.886	1.642
	5	1.586	1.829	1.820	1.784	1.789	1.589
	เฉลี่ย	1.802	1.842	1.777	1.686	1.769	1.665

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.28 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกหลังการฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก(mN m^2/g) -การทดลองครั้งที่ 1					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	2.336	3.079	2.516	2.508	2.595	2.436
	2	2.590	2.504	2.733	2.388	2.669	2.438
	3	2.367	2.701	2.723	2.259	2.192	2.945
	4	2.302	2.476	3.031	2.421	2.542	2.551
	5	2.543	2.531	2.936	2.470	2.598	2.492
	เฉลี่ย	2.428	2.658	2.788	2.409	2.572	2.572
5	1	2.408	2.542	2.842	2.625	2.477	2.569
	2	2.190	2.499	2.607	2.281	2.399	2.384
	3	2.152	2.673	2.823	2.354	2.625	3.018
	4	2.580	2.604	2.842	3.064	2.558	2.906
	5	2.737	2.559	2.586	2.888	2.590	2.913
	เฉลี่ย	2.420	2.575	2.740	2.643	2.530	2.758
10	1	2.031	2.639	2.653	2.491	2.819	2.478
	2	2.118	2.374	2.819	2.490	2.390	2.403
	3	2.811	2.410	2.739	3.389	2.888	2.973
	4	2.859	2.799	2.921	3.210	2.704	2.936
	5	2.681	3.049	2.708	2.631	2.874	3.033
	เฉลี่ย	2.500	2.654	2.768	2.842	2.735	2.765

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณ H_2O_2 (%)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก(mN m^2/g) -การทดลองครั้งที่ 2					
		หญ้าคา			หญ้าแฝก		
		0 IU	6.2 IU	18.6 IU	0 IU	6.2 IU	18.6 IU
0	1	2.318	2.490	2.563	2.374	2.451	2.449
	2	2.490	2.391	2.812	2.374	2.134	2.710
	3	1.875	2.419	2.921	2.170	2.710	2.522
	4	2.257	2.445	2.531	2.506	2.932	2.414
	5	2.501	2.525	2.424	2.626	2.508	2.882
	เฉลี่ย	2.288	2.456	2.650	2.410	2.547	2.596
5	1	2.659	2.639	2.935	2.757	2.763	2.600
	2	2.478	2.658	2.572	2.342	2.584	2.530
	3	2.572	2.654	2.580	2.259	2.686	3.285
	4	2.451	2.614	2.653	2.974	2.669	3.210
	5	2.885	2.555	3.079	2.912	2.793	3.026
	เฉลี่ย	2.609	2.624	2.764	2.650	2.699	2.930
10	1	2.031	2.395	2.852	2.671	2.805	3.060
	2	2.118	2.423	2.785	2.317	2.587	2.989
	3	2.811	2.723	2.653	3.109	2.933	3.109
	4	2.859	2.644	2.730	2.931	2.988	2.575
	5	2.681	2.961	2.857	2.897	3.077	3.084
	เฉลี่ย	2.500	2.629	2.775	2.785	2.878	2.964

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	NaOH (%)	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan[a]	15.00	10	60.3120	
	7.50	10	61.0530	
	12.50	10		67.5760
	10.00	10		68.4140
	Sig.		.730	.697

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.2 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	NaOH (%)	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan[a]	15.00	10	50.2760	
	7.50	10	50.5210	50.5210
	12.50	10	53.7930	53.7930
	10.00	10		55.8500
	Sig.		.196	.052

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.3 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

Dependent Variable		(I) NaOH (%)	(J) NaOH (%)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Lower Bound	Upper Bound
หญ้าคา	LSD	7.50	10.00	-7.36100*	2.13188	.001	-11.6847	-3.0373
			12.50	-6.52300*	2.13188	.004	-10.8467	-2.1993
			15.00	.74100	2.13188	.730	-3.5827	5.0647
		10.00	7.50	7.36100*	2.13188	.001	3.0373	11.6847
			12.50	.83800	2.13188	.697	-3.4857	5.1617
			15.00	8.10200*	2.13188	.001	3.7783	12.4257
		12.50	7.50	6.52300*	2.13188	.004	2.1993	10.8467
			10.00	-.83800	2.13188	.697	-5.1617	3.4857
			15.00	7.26400*	2.13188	.002	2.9403	11.5877
		15.00	7.50	-.74100	2.13188	.730	-5.0647	3.5827
			10.00	-8.10200*	2.13188	.001	-12.4257	-3.7783
			12.50	-7.26400*	2.13188	.002	-11.5877	-2.9403
หญ้าแฝก	LSD	7.50	10.00	-5.32900*	2.51828	.041	-10.4363	-.2217
			12.50	-3.27200	2.51828	.202	-8.3793	1.8353
			15.00	.24500	2.51828	.923	-4.8623	5.3523
		10.00	7.50	5.32900*	2.51828	.041	.2217	10.4363
			12.50	2.05700	2.51828	.419	-3.0503	7.1643
			15.00	5.57400*	2.51828	.033	.4667	10.6813
		12.50	7.50	3.27200	2.51828	.202	-1.8353	8.3793
			10.00	-2.05700	2.51828	.419	-7.1643	3.0503
			15.00	3.51700	2.51828	.171	-1.5903	8.6243
		15.00	7.50	-.24500	2.51828	.923	-5.3523	4.8623
			10.00	-5.57400*	2.51828	.033	-10.6813	-.4667
			12.50	-3.51700	2.51828	.171	-8.6243	1.5903

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.4 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	NaOH (%)	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan[a]	7.50	10	2.23950	
	15.00	10	2.31040	
	12.50	10	2.46740	2.46740
	10.00	10		2.60100
	Sig.		.078	.269

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.5 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	NaOH (%)	N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Duncan[a]	7.50	10	1.76210		
	15.00	10		1.97090	
	12.50	10			2.16030
	10.00	10			2.20870
	Sig.		1.000	1.000	.509

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.6 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

Dependent Variable	(I) NaOH (%)	(J) NaOH (%)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
หญ้าคา LSD	7.50	10.00	-.361500*	.119089	.004	-.60302	-.11998
		12.50	-.227900	.119089	.064	-.46942	.01362
		15.00	-.070900	.119089	.555	-.31242	.17062
	10.00	7.50	.361500*	.119089	.004	.11998	.60302
		12.50	.133600	.119089	.269	-.10792	.37512
		15.00	.290600*	.119089	.020	.04908	.53212
	12.50	7.50	.227900	.119089	.064	-.01362	.46942
		10.00	-.133600	.119089	.269	-.37512	.10792
		15.00	.157000	.119089	.196	-.08452	.39852
	15.00	7.50	.070900	.119089	.555	-.17062	.31242
		10.00	-.290600*	.119089	.020	-.53212	-.04908
		12.50	-.157000	.119089	.196	-.39852	.08452
หญ้าแฝก LSD	7.50	10.00	-.446600*	.072613	.000	-.59387	-.29933
		12.50	-.398200*	.072613	.000	-.54547	-.25093
		15.00	-.208800*	.072613	.007	-.35607	-.06153
	10.00	7.50	.446600*	.072613	.000	.29933	.59387
		12.50	.048400	.072613	.509	-.09887	.19567
		15.00	.237800*	.072613	.002	.09053	.38507
	12.50	7.50	.398200*	.072613	.000	.25093	.54547
		10.00	-.048400	.072613	.509	-.19567	.09887
		15.00	.189400*	.072613	.013	.04213	.33667
	15.00	7.50	.208800*	.072613	.007	.06153	.35607
		10.00	-.237800*	.072613	.002	-.38507	-.09053
		12.50	-.189400*	.072613	.013	-.33667	-.04213

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.7 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	NaOH (%)	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan[a]	10.00	10	1.35350	
	7.50	10	1.46270	1.46270
	15.00	10	1.57550	1.57550
	12.50	10		1.68500
	Sig.		.090	.090

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.8 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	NaOH (%)	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan[a]	7.50	10	1.11220	
	15.00	10		1.41910
	10.00	10		1.45750
	12.50	10		1.48480
	Sig.		1.000	.347

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.9 ค่าความแตกต่างของค่าความ

ต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและ หญ้าแฝกที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

Dependent Variable		(I) NaOH (%)	(J) NaOH (%)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Lower Bound	Upper Bound
หญ้าคา	LSD	7.50	10.00	.109200	.120883	.372	-.13596	.35436
			12.50	-.222300	.120883	.074	-.46746	.02286
			15.00	-.112800	.120883	.357	-.35796	.13236
		10.00	7.50	-.109200	.120883	.372	-.35436	.13596
			12.50	-.331500*	.120883	.009	-.57666	-.08634
			15.00	-.222000	.120883	.075	-.46716	.02316
		12.50	7.50	.222300	.120883	.074	-.02286	.46746
			10.00	.331500*	.120883	.009	.08634	.57666
			15.00	.109500	.120883	.371	-.13566	.35466
		15.00	7.50	.112800	.120883	.357	-.13236	.35796
			10.00	.222000	.120883	.075	-.02316	.46716
			12.50	-.109500	.120883	.371	-.35466	.13566
หญ้าแฝก	LSD	7.50	10.00	-.345300*	.064883	.000	-.47689	-.21371
			12.50	-.372600*	.064883	.000	-.50419	-.24101
			15.00	-.306900*	.064883	.000	-.43849	-.17531
		10.00	7.50	.345300*	.064883	.000	.21371	.47689
			12.50	-.027300	.064883	.676	-.15889	.10429
			15.00	.038400	.064883	.558	-.09319	.16999
		12.50	7.50	.372600*	.064883	.000	.24101	.50419
			10.00	.027300	.064883	.676	-.10429	.15889
			15.00	.065700	.064883	.318	-.06589	.19729
		15.00	7.50	.306900*	.064883	.000	.17531	.43849
			10.00	-.038400	.064883	.558	-.16999	.09319
			12.50	-.065700	.064883	.318	-.19729	.06589

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.10 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับและเวลาต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา 60 นาที	Between Groups	19.740	1	19.740	3.210	.111
	Within Groups	49.191	8	6.149		
	Total	68.931	9			
หญ้าคา 90 นาที	Between Groups	8.892	1	8.892	.609	.458
	Within Groups	116.847	8	14.606		
	Total	125.739	9			
หญ้าคา 120 นาที	Between Groups	24.149	1	24.149	2.621	.144
	Within Groups	73.715	8	9.214		
	Total	97.865	9			
หญ้าแฝก 60 นาที	Between Groups	6.642	1	6.642	1.546	.249
	Within Groups	34.360	8	4.295		
	Total	41.002	9			
หญ้าแฝก 90 นาที	Between Groups	21.374	1	21.374	5.161	.053
	Within Groups	33.135	8	4.142		
	Total	54.509	9			
หญ้าแฝก 120 นาที	Between Groups	13.386	1	13.386	4.034	.079
	Within Groups	26.547	8	3.318		
	Total	39.933	9			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.11 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับและเวลาต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา 60 นาที	Between Groups	19.740	1	19.740	3.210	.111
	Within Groups	49.191	8	6.149		
	Total	68.931	9			
หญ้าคา 90 นาที	Between Groups	8.892	1	8.892	.609	.458
	Within Groups	116.847	8	14.606		
	Total	125.739	9			
หญ้าคา 120 นาที	Between Groups	24.149	1	24.149	2.621	.144
	Within Groups	73.715	8	9.214		
	Total	97.865	9			
หญ้าแฝก 60 นาที	Between Groups	6.642	1	6.642	1.546	.249
	Within Groups	34.360	8	4.295		
	Total	41.002	9			
หญ้าแฝก 90 นาที	Between Groups	21.374	1	21.374	5.161	.053
	Within Groups	33.135	8	4.142		
	Total	54.509	9			
หญ้าแฝก 120 นาที	Between Groups	13.386	1	13.386	4.034	.079
	Within Groups	26.547	8	3.318		
	Total	39.933	9			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.12 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับและเวลาต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา 60 นาที	Between Groups	.009	2	.004	2.586	.144
	Within Groups	.012	7	.002		
	Total	.020	9			
หญ้าคา 90 นาที	Between Groups	.014	2	.007	3.313	.097
	Within Groups	.015	7	.002		
	Total	.028	9			
หญ้าคา 120 นาที	Between Groups	.005	2	.003	1.851	.226
	Within Groups	.010	7	.001		
	Total	.015	9			
หญ้าแฝก 60 นาที	Between Groups	1.606	2	.803	32.423	.000
	Within Groups	.173	7	.025		
	Total	1.779	9			
หญ้าแฝก 90 นาที	Between Groups	1.472	2	.736	70.043	.000
	Within Groups	.074	7	.011		
	Total	1.545	9			
หญ้าแฝก 120 นาที	Between Groups	1.934	2	.967	31.330	.000
	Within Groups	.216	7	.031		
	Total	2.150	9			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.13 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา	Between Groups	62.173	3	20.724	1.168	.366
	Within Groups	195.245	11	17.750		
	Total	257.418	14			
หญ้าแฝก	Between Groups	40.537	3	13.512	1.143	.375
	Within Groups	130.076	11	11.825		
	Total	170.613	14			

ตารางที่ ค.14 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา	Between Groups	.035	3	.012	.291	.831
	Within Groups	.438	11	.040		
	Total	.473	14			
หญ้าแฝก	Between Groups	.128	3	.043	1.855	.196
	Within Groups	.254	11	.023		
	Total	.382	14			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.15 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา	Between Groups	.773	2	.387	3.015	.087
	Within Groups	1.539	12	.128		
	Total	2.312	14			
หญ้าแฝก	Between Groups	.086	2	.043	2.106	.164
	Within Groups	.244	12	.020		
	Total	.329	14			

ตารางที่ ค.16 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

			Subset for alpha = 0.05			
	Conditions	N	1	2	3	4
Duncan[a]	$10\%H_2O_2$	10	43.2820			
	18.6 IU +$10\%H_2O_2$	10	43.7670	43.7670		
	18.6 IU+ $5\%H_2O_2$	10	44.5460	44.5460		
	$5\ \%H_2O_2$	10	45.3240	45.3240		
	6.2 IU +$10\%H_2O_2$	10		46.7030	46.7030	
	18.6 IU	10			48.3450	
	6.2 + $5\%H_2O_2$	10			48.6960	
	6.2 IU	10			49.5210	
	ไม่ฟอก	10				58.6660
	Sig.		.195	.061	.072	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.17 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	Conditions	N	Subset for alpha = 0.05				
			1	2	3	4	5
Duncan[a]	18.6 IU +10%H_2O_2	10	34.5300				
	18.6 IU+ 5%H_2O_2	10	35.9010	35.9010			
	10%H_2O_2	10		37.3060	37.3060		
	5 %H_2O_2	10		38.0510	38.0510		
	6.2 IU +10%H_2O_2	10		38.1490	38.1490		
	6.2 + 5%H_2O_2	10		38.5750	38.5750		
	18.6 IU	10			39.7800	39.7800	
	6.2 IU	10				42.0160	
	ไม่ฟอก	10					55.4920
	Sig.		.287	.064	.088	.084	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.18 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา	Between Groups	1765.291	8	220.661	21.922	.000
	Within Groups	815.316	81	10.066		
	Total	2580.607	89			
หญ้าแฝก	Between Groups	3073.460	8	384.183	47.039	.000
	Within Groups	661.547	81	8.167		
	Total	3735.007	89			

ตารางที่ ค.19 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

Duncan[a]

Conditions	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
18.6 IU +10%H_2O_2	10	1.77580				
18.6 IU+ 5%H_2O_2	10	1.80160	1.80160			
10%H_2O_2	10	1.81500	1.81500	1.81500		
6.2 IU +10%H_2O_2	10	1.84920	1.84920	1.84920	1.84920	
5 %H_2O_2	10	1.86630	1.86630	1.86630	1.86630	
6.2 + 5%H_2O_2	10		1.88280	1.88280	1.88280	
18.6 IU	10			1.90290	1.90290	
6.2 IU	10				1.92620	
ไม่ฟอก	10					2.14280
Sig.		.055	.087	.063	.105	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.20 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

Duncan[a]

Conditions	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
18.6 IU +10%H_2O_2	10	1.68690		
10%H_2O_2	10	1.68740		
18.6 IU+ 5%H_2O_2	10	1.70780	1.70780	
5 %H_2O_2	10	1.74740	1.74740	
6.2 IU +10%H_2O_2	10	1.74890	1.74890	
18.6 IU	10	1.79030	1.79030	
6.2 + 5%H_2O_2	10	1.79560	1.79560	
6.2 IU	10		1.82230	
ไม่ฟอก	10			2.10590
Sig.		.070	.053	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.21 ค่าความแตกต่างของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา	Between Groups	.939	8	.117	13.423	.000
	Within Groups	.708	81	.009		
	Total	1.647	89			
หญ้าแฝก	Between Groups	1.323	8	.165	12.519	.000
	Within Groups	1.070	81	.013		
	Total	2.392	89			

ตารางที่ ค.22 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	Conditions	N	Subset for alpha = 0.05			
			1	2	3	4
Duncan[a]	ไม่ฟอก	10	2.35790			
	6.2 IU	10	2.45700	2.45700		
	5 %H_2O_2	10	2.51120	2.51120	2.51120	
	10%H_2O_2	10		2.59620	2.59620	2.59620
	6.2 + 5%H_2O_2	10		2.59920	2.59920	2.59920
	6.2 IU +10%H_2O_2	10		2.64170	2.64170	2.64170
	18.6 IU+ 5%H_2O_2	10		2.65190	2.65190	2.65190
	18.6 IU	10			2.71900	2.71900
	18.6 IU +10%H_2O_2	10				2.77150
	Sig.		.177	.112	.090	.154

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.23 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

	c	N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Duncan[a]	ไม่ฟอก	10	2.40960		
	6.2 IU	10	2.53310	2.53310	
	18.6IU	10	2.58390	2.58390	2.58390
	6.2 + 5%H_2O_2	10	2.61360	2.61360	2.61360
	5 %H_2O_2	10	2.64560	2.64560	2.64560
	18.6 IU +10%H_2O_2	10		2.76400	2.76400
	6.2 IU +10%H_2O_2	10			2.80650
	10%H_2O_2	10			2.81380
	18.6 IU+ 5%H_2O_2	10			2.84410
	Sig.		.072	.078	.054

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

ตารางที่ ค.24 ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากหญ้าคาและหญ้าแฝกที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
หญ้าคา	Between Groups	1.340	8	.167	2.976	.006
	Within Groups	4.558	81	.056		
	Total	5.898	89			
หญ้าแฝก	Between Groups	1.762	8	.220	3.280	.003
	Within Groups	5.437	81	.067		
	Total	7.199	89			

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวสุธิดา มุลาลินน์ เกิดวันที่ 29 กันยายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดเชียงราย

ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและบรรจุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย

ผลงานทางวิชาการ

S. Mulalin, S. Prasongsuk and S. Chaiareekij. (2008). Use of Cogon and Vetiver Grasses for Pulping and Papermaking. The 4th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress, National University of Singapore, Singapore. P.165-168

S. Mulalin, S. Prasongsuk, S. Chaiareekij and H. Punnapayak. (2009). Production of Pulp and Paper from Cogon and Vetiver Grasses. The 12th National Graduate Research Conference, Khon Kaen University, Thailand. P.679-684

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย