# ผลของไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความสามารถในการฟอกได้ของเยื่อต้นข้าวโพด

นางสาวสุภาภรณ์ ฤทธิ์กล้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

# EFFECTS OF XYLANASE AND LACCASE COMBINED WITH HYDROGEN PEROXIDE ON BLEACHABILITY OF CORN STALK PULP

Miss Supaporn Ritgla

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความสามารถในการฟอกได้ของเยื่อต้นข้าวโพด |
| โดย | นางสาวสุภาภรณ์ ฤทธิ์กล้า |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีหนาท ประสงค์สุข |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีหนาท ประสงค์สุข)

……กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ)

……กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด)

สุภาภรณ์ ฤทธิ์กล้า : ผลของไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความสามารถในการฟอกได้ของเยื่อต้นข้าวโพด (EFFECTS OF XYLANASE AND LACCASE COMBINED WITH HYDROGEN PEROXIDE ON BLEACHABILITY OF CORN STALK PULP) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สีหนาท ประสงค์สุข, 104 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการฟอกเยื่อจากต้นข้าวโพดโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและเอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเริ่มจากการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อที่ปริมาณต่างๆ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่าการฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างและความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้นแต่ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง การใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นปรากฏและความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ส่วนความทึบแสงและความเรียบมีค่าลดลง ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ส่วนการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสหรือเอนไซม์แลกเคสที่ปริมาณต่างๆ คือ ร้อยละ 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเยื่อแห้งร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อนั้นพบว่า การใช้เอนไซม์ทำให้ความขาวสว่าง ความเรียบ ความหนาแน่นปรากฏ ความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความทึบแสงลดลง การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความเรียบเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้เอนไซม์แลกเคสในปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง ส่วนปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสและเอนไซม์แลกเคสที่เหมาะสมคือที่ร้อยละ 20 เนื่องจากให้ค่าความขาวสว่างและความแข็งแรงไม่แตกต่างจากที่ปริมาณอื่นมากนัก เมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนส (X) และเอนไซม์แลกเคส (L) ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (P) โดยใช้ลำดับการฟอกเยื่อต่างกัน ได้แก่ XLP, LXP และ (X+L)P พบว่าลำดับการฟอกเยื่อ XLP, LXP และ (X+L)P ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นปรากฏ ความเรียบ ความขาวสว่างและความทึบแสง ในขณะที่ลำดับการฟอกเยื่อ XLP และ LXP ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงและความต้านทานแรงฉีก แต่ (X+L)P ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น การใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษไม่ต่างจากการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียวร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต.....

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

## 5272599023 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY
KEYWORDS : CORN STALK / SODA PULPING / BLEACHING / XYLANASE / LACCASE

SUPAPORN RITGLA: EFFECTS OF XYLANASE AND LACCASE COMBINED WITH HYDROGEN PEROXIDE ON BLEACHABILITY OF CORN STALK PULP. ADVISOR: ASST. PROF. SEHANAT PRASONGSUK, Ph.D. 104 pp.

Bleaching of corn stalk pulp using xylanase and laccase combined with hydrogen peroxide ($H_2O_2$) was studied. Various $H_2O_2$ dosages of 5%, 10% and 15% based on oven dried (O.D.) pulp weight were used. The results indicated that $H_2O_2$ bleaching increased brightness and tear resistance but decreased tensile strength. Higher dosage of $H_2O_2$ led to higher apparent density and brightness but lower opacity and smoothness. The optimal dosage of $H_2O_2$ was equal to 15%. Then, various dosages of xylanase and laccase equal to 20%, 30% and 40% based on O.D. pulp weight were employed with $H_2O_2$. It was found that use of enzyme increased brightness, smoothness, apparent density and tear resistance but decreased tensile strength and opacity. Higher dosage of xylanase and laccase caused higher smoothness and lower tensile strength respectively. The optimal dosages of xylanase and laccase were equal to 20% and brightness and strength obtained using this enzyme optimal dosage did not differ from using other dosages. Pulp bleaching using xylanase (X) and laccase (L) combined with $H_2O_2$ (P) with the bleaching sequences of XLP, LXP and (X+L)P were also studied and discovered that apparent density, smoothness, brightness and opacity obtained from XLP, LXP and (X+L)P were not different. Although XLP and LXP did not affect tensile strength and tear resistance, (X+L)P led to higher tensile strength and tear resistance. Also, it was found that pulp and paper properties using these two enzymes together with $H_2O_2$ did not differ from using each enzyme together with $H_2O_2$.

Field of Study : Pulp and Paper Technology Student's Signature .....
Academic Year: 2011 ..... Advisor's Signature .....

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร.สีหนาท ประสงค์สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง สนับสนุนและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนดูแลผู้วิจัยตั้งแต่แรกเข้าการศึกษาจนจบการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. อรัญ หาญสืบสาย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ และอาจารย์ ดร. นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโครงการวิทยาเพื่อพื้นถิ่นตามแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณพี่ๆ ทุกคนของผู้วิจัยที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนทางด้านการเรียนและการวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 1

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 1

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น..... 3

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย..... 3

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย..... 3

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย..... 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... 5

2.1.1 แหล่งที่มาของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษ..... 5

2.1.2 โครงสร้างของเส้นใย..... 8

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้..... 9

2.1.4 ข้าวโพด..... 15

2.1.5 กระบวนการผลิตเยื่อ..... 19

2.1.6 การฟอกเยื่อ..... 20

2.1.8 เอนไซม์ไซแลนเนส..... 23

2.1.9 เอนไซม์แลกเคส..... 24

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 24

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 26

3.1.1 วัสดุและสารเคมี..... 26

3.1.2 เครื่องมือ..... 26

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย..... 28

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: การหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพดด้วยวิธีโซดา..... 28

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: ศึกษาผลของการฟอกเยื่อกระดาษจากต้นข้าวโพดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 35

3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: ศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและ/หรือแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากลำต้นข้าวโพด..... 36

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ..... 40

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีโซดา..... 41

4.2 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด..... 49

4.3 ผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากต้นข้าวโพด..... 57

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 86

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 88

รายการอ้างอิง..... 89

หน้า

ภาคผนวก..... 92
ภาคผนวก ก..... 93
ภาคผนวก ข..... 98
ภาคผนวก ค..... 100

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์……..… 104

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2-1 | ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ ..... | 18 |
| 2-2 | องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ..... | 18 |
| 2-3 | สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ..... | 21 |
| 4-1 | สมบัติของเยื่อข้าวโพดที่ผลิตด้วยวิธีโซดา..... | 41 |
| 4-2 | สภาพระบายน้ำของเยื่อก่อนบดเยื่อและปริมาณด่างที่เหลือหลังการต้มเยื่อด้วยวิธีโซดา..... | 42 |
| 4-3 | ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากเยื่อข้าวโพดที่ผลิตด้วยวิธีโซดา..... | 43 |
| 4-4 | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ ต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อจากต้นข้าวโพด..... | 49 |
| 4-5 | สัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... | 50 |
| 4-6 | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระดับต่างๆ ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบ..... | 57 |
| 4-7 | ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... | 58 |
| 4-8 | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษและเส้นใย..... | 66 |
| 4-9 | ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ฟอกด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... | 67 |
| 4-10 | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษและเส้นใย..... | 75 |
| 4-11 | ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... | 77 |
| 4-12 | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการลำดับการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษและเส้นใย..... | 83 |
| 4-13 | สมบัติของแผ่นทดสอบที่ได้จากการใช้เอนไซม์ในการฟอกเยื่อร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... | 84 |

# สารบัญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2-1 | ชนิดของเซลล์ในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง…….. | 6 |
| 2-2 | โครงสร้างของเส้นใย…….. | 8 |
| 2-3 | ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (M) ของโครงสร้างเส้นใย…….. | 8 |
| 2-4 | โครงสร้างของเซลลูโลส…….. | 10 |
| 2-5 | บริเวณส่วนที่เป็นผลึก (crystalline regions) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous regions) ของเซลลูโลส..... | 10 |
| 2-6 | น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส…… | 11 |
| 2-7 | โครงสร้างของไซแลน..... | 12 |
| 2-8 | โครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้ (Courtesy of Espere)…… | 13 |
| 2-9 | หน่วยโครงสร้างหลักของลิกนิน…… | 14 |
| 2-10 | องค์ประกอบทางเคมีของชั้นผนังเซลล์เส้นใย…….. | 14 |
| 2-11 | การเข้าไปทำปฏิกิริยาของไซแลนเนสในโครงสร้างที่เป็นสารประกอบลิกนิน-คาร์บอไฮเดรต…… | 23 |
| 3-1 | เครื่องต้มเยื่อ (Autoclave digester)…… | 28 |
| 3-2 | เครื่องบดเยื่อ (valley beater)…….. | 29 |
| 3-3 | เครื่องวัดความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness tester)…… | 30 |
| 3-4 | เครื่องวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (FQA)…… | 31 |
| 3-5 | เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ…… | 32 |
| 3-6 | เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นชิ้นทดสอบ (Color Touch PC)..... | 33 |
| 3-7 | เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง…….. | 34 |
| 3-8 | เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก…… | 35 |
| 4-1 | ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด ..... | 44 |
| 4-2 | ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... | 45 |
| 4-3 | ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... | 45 |

ภาพที่ หน้า

4-4 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด ..... 46
4-5 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 47
4-6 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 48
4-7 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 52
4-8 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 52
4-9 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 53
4-10 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 54
4-11 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 55
4-12 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 56
4-13 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 60
4-14 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 60
4-15 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 61
4-16 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 62
4-17 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด..... 64

| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 4-18 | ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 65 |
| 4-19 | ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 69 |
| 4-20 | ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 69 |
| 4-21 | ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 71 |
| 4-22 | ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 72 |
| 4-23 | ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 73 |
| 4-24 | ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 74 |
| 4-25 | ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 78 |
| 4-26 | ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 78 |
| 4-27 | ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 79 |
| 4-28 | ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 81 |
| 4-29 | ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 82 |
| 4-30 | ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด | 82 |

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้วเศษลำต้นข้าวโพดสามารถนำไปทำปุ๋ย อาหารเลี้ยงสัตว์ หรือผลิตเอทานอลได้ อย่างไรก็ตามหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้ว ลำต้นข้าวโพดส่วนใหญ่กลับถูกไถกลบหรือเผาทิ้งเพื่อให้ได้พื้นที่สำหรับทำการปลูกข้าวโพดครั้งต่อไป จากลักษณะสันฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากลำต้นข้าวโพดแสดงให้เห็นว่า ข้าวโพดสามารถนำมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษและกระดาษได้ และเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของเยื่อกระดาษ เยื่อกระดาษควรผ่านการฟอกเยื่อเพื่อเพิ่มความขาวสว่างให้แก่เยื่อกระดาษนั้น โดยทั่วไปแล้วการฟอกเยื่อ คือ การใช้สารเคมีในการกำจัดหรือเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนินที่เหลือมาจากกระบวนการผลิตเยื่อ เพื่อมิให้ลิกนินนั้นไวต่อแสงจนเปลี่ยนโครงสร้างทำให้กระดาษกลายเป็นสีเหลือง สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อโดยเฉพาะกลุ่มที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจัดเป็นสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดมะเร็ง การนำเทคโนโลยีชีวภาพมาใช้ในการฟอกเยื่อจึงเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจนำไซแลนเนสและแลกเคสในปริมาณต่างๆ มาใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพดที่ผลิตโดยวิธีโซดา ซึ่งไซแลนเนสจะไปทำปฏิกิริยากับส่วนเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย ในขณะที่แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับส่วนลิกนินของเส้นใย ทั้งนี้เพื่อดูว่าการใช้เอนไซม์ดังกล่าวจะส่งผลต่อปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ และมีผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้อย่างไร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลของการใช้ไซแลนเนสและแลกเคสในการฟอกเยื่อร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ได้หลังจากการฟอกเยื่อ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการผลิตเยื่อวิธีโซดา (soda pulping) จากลำต้นข้าวโพดเพื่อใช้ในการฟอกเยื่อ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (liquor to wood ratio, L:W) คือ 9 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 120 นาที นำเยื่อที่ผลิตได้มาทำการบดเยื่อ (beating) ให้มีค่าสภาพ

ระบายได้ (freeness) ของเยื่อข้าวโพดประมาณ 300-350 มิลลิลิตร จากนั้นนำเยื่อของแต่ละระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบแล้วเลือกภาวะที่เหมาะสมมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1.3.2 ทำการฟอกเยื่อที่เลือกจากจากข้อ 1.3.1 ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่อุณหภูมิ 75±2 องศาเซลเซียส pH 10.5 ใช้เวลาในการฟอกเยื่อ 90 นาที นำเยื่อของแต่ละระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบแล้วเลือกภาวะที่เหมาะสมมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1.3.3 ทำการฟอกเยื่อโดยใช้ไซแลนเนสที่ปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่ค่า pH 5.5 อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำเยื่อส่วนหนึ่งมาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบ นำเยื่อส่วนที่เหลือซึ่งผ่านการฟอกด้วยไซแลนเนสแล้วมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากข้อ 1.3.2 จากนั้นนำเยื่อมาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบเพื่อหาระดับของไซแลนเนสที่ดีที่สุด

1.3.4 ทำการฟอกเยื่อโดยใช้แลกเคสปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่ค่า pH 5.5 อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำเยื่อส่วนหนึ่งมาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบ นำเยื่อส่วนที่เหลือซึ่งผ่านการฟอกด้วยไซแลกเคสแล้วมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากข้อ 1.3.2 จากนั้นนำเยื่อมาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบเพื่อหาระดับของแลกเคสที่ดีที่สุด

1.3.5 ทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ลำดับการฟอกเยื่อที่ต่างกัน ได้แก่ การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนส เอนไซม์แลกเคส ตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคส เอนไซม์ไซแลนเนส ตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ รวมถึงการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับเอนไซม์แลกเคส ตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากนั้นนำเยื่อส่วนหนึ่งมาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบ เพื่อดูว่าลำดับการฟอกเยื่อที่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษอย่างไร รวมถึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับภาวะการ

ฟอกเยื่อที่เหมาะสมในกรณีที่ทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในหัวข้อ 1.3.3 และเอนไซม์แลกเคสในหัวข้อ 1.3.4 เพื่อดูว่าเอนไซม์และลำดับการฟอกเยื่อใดให้สมบัติของเยื่อและกระดาษหลังฟอกเยื่อที่ดีที่สุด

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

การทดลองจะศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษจากลำต้นข้าวโพด ซึ่งฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

## 1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

โดยทั่วไปเกษตรกรจะปล่อยให้ฝักข้าวโพดเลี้ยงสัตว์แห้งก่อนจะทำการเก็บเกี่ยวผลผลิต ส่งผลให้ลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์แห้งไปด้วย ทำให้การตัดลำต้นเป็นท่อนยากลำบาก รวมถึงอาจมีเชื้อราและสิ่งเจือปนเกิดขึ้นได้ในระหว่างการตากลำต้นให้แห้ง ซึ่งอาจส่งผลต่อความผันแปรของลำต้นข้าวโพดที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในส่วนของเอนไซม์นั้นอาจมีข้อจำกัดตรงที่เอนไซม์ที่ผลิตเพื่อใช้ในการฟอกเยื่อไม่สามารถเก็บไว้ได้นานและมีแอคติวิตีที่ไม่แน่นอน

## 1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping) เป็นกระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้ให้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (individual fiber) ให้เหมาะสมต่อการผลิตกระดาษ การแยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้ให้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ อาจทำได้ 2 วิธี คือ การละลายลิกนินออกจากเนื้อไม้โดยใช้สารเคมี เพื่อให้ได้เส้นใยเดี่ยวๆ ออกมา ซึ่งเรียกกระบวนการผลิตเยื่อแบบนี้ว่า การผลิตเยื่อแบบเคมี (chemical pulping) รวมถึงการใช้แรงกลในการแยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้โดยไม่มีการกำจัดเอาลิกนินออกก่อน หากเพียงแต่ทำให้ลิกนินอ่อนตัวลงด้วยความร้อน เพื่อให้สามารถแยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้ได้ง่ายขึ้น ซึ่งเรียกกระบวนการผลิตเยื่อแบบนี้ว่า การผลิตเยื่อแบบเชิงกล (mechanical pulping)

การฟอกเยื่อ (bleaching) เป็นการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้นโดยการใช้สารเคมีไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน เนื่องจากเยื่อที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเพียงอย่างเดียวมักมีค่าความขาวสว่างที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นหากต้องการเพิ่มความขาวสว่างให้เยื่อ ควรนำเยื่อมาทำการฟอกเยื่อ

การฟอกเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์เพื่อลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ การฟอกเยื่อด้วยวิธีนี้นอกจากสามารถปรับปรุงสมบัติของเยื่อและกระดาษให้ดีขึ้นแล้ว ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเอนไซม์สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลพื้นฐานของเยื่อและกระดาษซึ่งผลิตจากลำต้นข้าวโพดที่ฟอกโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคส และการใช้เอนไซม์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

## 1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.8.2 หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาจากต้นข้าวโพด

1.8.3 หาภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.8.4 หาภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.8.5 หาภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลกเคสตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.8.6 ฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนส เอนไซม์แลกเคส ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ลำดับการฟอกเยื่อต่างๆ กัน

1.8.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.8.8 เรียบเรียงเนื้อหาเพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

# บทที่ 2
# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศจึงมีเศษเหลือภายหลังการเก็บเกี่ยวเป็นจำนวนมาก จากการศึกษาเกี่ยวกับเส้นใยจากต้นข้าวโพดพบว่า เส้นใยจากต้นข้าวโพดมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตกระดาษได้ แต่ยังให้ความขาวสว่างที่ต่ำจึงจำเป็นต้องมีการฟอกเยื่อเพื่อเพิ่มความขาวสว่างให้แก่เยื่อ โดยทั่วไปแล้วการฟอกเยื่อ คือ การใช้สารเคมีในการกำจัดหรือเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนินที่เหลือมาจากกระบวนการต้มเยื่อ เพื่อมิให้ลิกนินนั้นไวต่อแสงจนเปลี่ยนโครงสร้างทำให้กระดาษกลายเป็นสีเหลือง อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อลง การใช้เทคโนโลยีชีวภาพมาช่วยในการฟอกเยื่อจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจนำเอนไซม์ไซแลนเนสและเอนไซม์แลกเคสในปริมาณต่างๆ มาใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพดที่ผลิตโดยวิธีโซดา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเอนไซม์ไซแลนเนสจะไปทำปฏิกิริยากับส่วนของไซแลนในเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย ในขณะที่แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับส่วนลิกนินของเส้นใย ดังนั้นการใช้เอนไซม์ดังกล่าวอาจช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการฟอกเยื่อเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

### 2.1.1 แหล่งที่มาของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษ

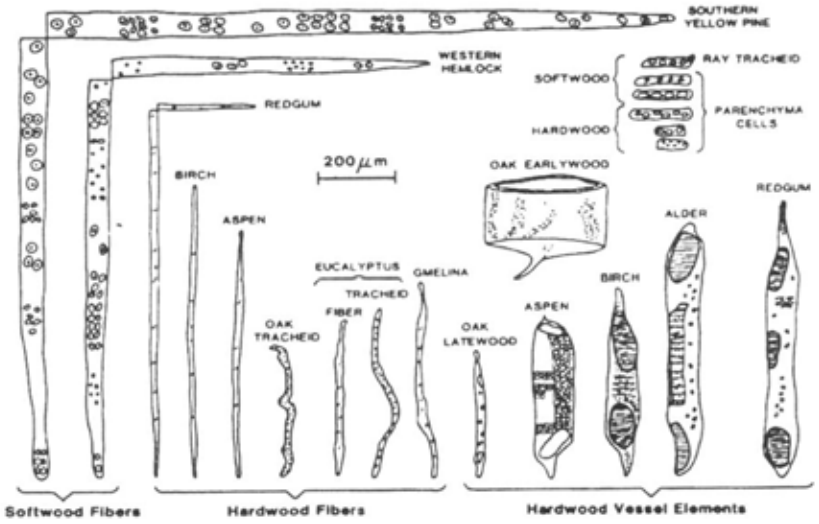
วัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษส่วนใหญ่ได้มาจากเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช ทั้งที่เป็นไม้ยืนต้นและไม้ล้มลุก โดยแหล่งเส้นใยส่วนใหญ่มาจากเนื้อไม้ และมีบางส่วนที่มาจากส่วนที่ไม่ใช่เนื้อไม้ เช่น ใบ ผล หรือลำต้นของพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ ได้เช่นกัน [1-3] ดังนั้นอาจแบ่งเส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษออกเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ และเส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้

#### 2.1.1.1 เส้นใยที่มาจากเนื้อไม้ (wood fiber)

2.1.1.1.1 ไม้เนื้ออ่อน (softwood) เป็นไม้ในกลุ่มของพืชเมล็ดเปลือยในกลุ่มของพวกไม้สน หรืออาจเรียกว่าเป็นไม้ใบแคบหรือไม้ไม่ผลัดใบ มีมากในแถบประเทศเขตหนาว เซลล์ที่พบในเนื้อไม้ในกลุ่มของไม้เนื้ออ่อนซึ่งเป็นพวกสนนั้น คือ เทรคีด (tracheid, fiber tracheid) พาเรนไคมาเซลล์ (parenchyma cell) และ เรซินเซลล์ (resin cell) โดยทั่วไปเทรคีดจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 90-95 ของปริมาตรเนื้อไม้ มีหน้าที่ลำเลียงน้ำและให้ความแข็งแรงของต้นไม้

ลักษณะของเทรคีดมีลักษณะเซลล์ค่อนข้างผอม ยาว หัวท้ายเซลล์ไม่มีรูทะลุ มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 2.5-7.0 มิลลิเมตร มีความกว้างประมาณ 25-60 ไมโครเมตร ส่วนเซลล์พาเรนไคมาและเรซินเซลล์จะมีอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 และร้อยละ 0.5-1.0 ของปริมาตรเนื้อไม้ ตามลำดับ เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจะมีลักษณะของโครงสร้างที่สม่ำเสมอ เซลล์ในเนื้อไม้โดยภาพรวมส่วนใหญ่จะมีลักษณะของเซลล์ยาว ตรง ทำให้ขั้นตอนหรือกระบวนการจัดการต่างๆ เกี่ยวกับเนื้อไม้ทำได้ง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

2.1.1.1.2 ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) เป็นเนื้อไม้ของพืชดอกในกลุ่มของพวกพืชใบเลี้ยงคู่ อาจเรียกว่าเป็นไม้ใบกว้าง (broadleafs) หรือไม้ผลัดใบ ตัวอย่าง เช่น ยูคาลิปตัส กระถินเทพา กระถินณรงค์ เป็นต้น ในกลุ่มของไม้เนื้อแข็งจะพบเซลล์หลายชนิดมากกว่าในไม้เนื้ออ่อน ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ได้แก่ เวสเซล (vessel element) ไฟเบอร์เทรคีด (fiber tracheid) ลิบริฟอร์มไฟเบอร์ (libriform fiber) เรย์เซลล์ (ray cell) และพาเรนไคมาเซลล์ (parenchyma cell)




**ภาพที่ 2-1** ชนิดของเซลล์ในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [4]

ในไม้เนื้อแข็งเซลล์เส้นใยจะมีหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้น ส่วนการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุจะเป็นหน้าที่ของเวสเซล ไม้เนื้อแข็งจะมีเส้นใยอยู่ประมาณร้อยละ 36-70 มีเวสเซลอยู่ร้อยละ 20-55 มีเรย์เซลล์อยู่ร้อยละ 6-20 และมีพาเรนไคมาอยู่ร้อยละ 2 ของปริมาตรเนื้อไม้ เส้นใยของไม้เนื้อแข็งจะมีความยาวประมาณ 0.9-1.5 มิลลิเมตร ส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้จากไม้เนื้อแข็งมีความ

แข็งแรงต่ำกว่าไม้เนื้ออ่อน แต่จะมีความเรียบเนียนมากกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน

2.1.1.2 **เส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้** (non wood fiber)

แม้ว่าไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งจะเป็นแหล่งเส้นใยที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษเป็นส่วนใหญ่ แต่พืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ยังมีส่วนสำคัญในการเป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษในหลายๆ ประเทศที่ปริมาณการผลิตเยื่อไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน ในอดีตการนำพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้มาทำการผลิตเยื่อไม่ค่อยเป็นที่นิยมเหมือนพวกเนื้อไม้ เพราะการจัดการวัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงกระบวนการผลิตยังไม่ค่อยได้มีการพัฒนา แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อ การออกแบบเครื่องมือ และกระบวนการทางวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการผลิตเยื่อจากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เพิ่มมากขึ้น

สำหรับพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

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

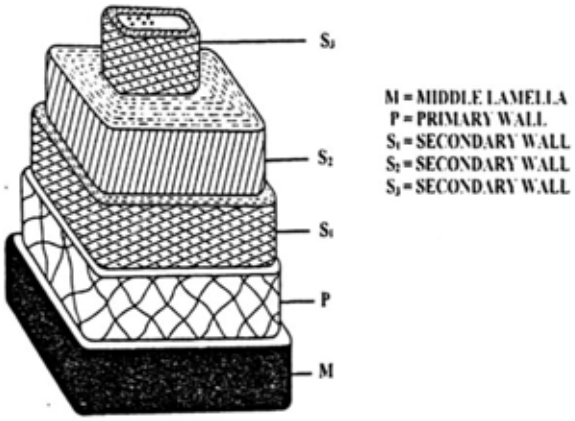
2.1.1.2.2 พืชล้มลุกที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ ไผ่ หญ้าต่างๆ เช่น กกอ้อ เป็นต้น

2.1.1.2.3 พืชล้มลุกที่มีการเพาะปลูก ได้แก่ ปอสา ลินิน ป่าน ปอกระเจา ฝ้าย เป็นต้น

อ้อย ต้นไผ่ ฟางข้าว หญ้ากกต่างๆ เป็นแหล่งวัตถุดิบหลักของพืชที่ไม่ให้เนื้อที่ใช้เป็นเส้นใยในการผลิตเยื่อและกระดาษ เยื่อที่ได้จากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เหล่านี้จะนำไปผสมกับเส้นใยที่ได้จากเนื้อไม้หรือเส้นใยรีไซเคิลเพื่อทำการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก กระดาษผิวกล่อง (linerboard) ถุงกระดาษ หรือหากมีการนำเยื่อที่ได้จากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เหล่านี้ไปทำการฟอกเยื่อก่อน อาจนำเยื่อที่ผ่านการฟอกแล้วไปผสมกับวัตถุดิบใช้ในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษส่งจดหมาย กระดาษโปสเตอร์ หรือกระดาษชำระได้ ส่วนพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้อื่นอาจนำไปผลิตกระดาษชนิดพิเศษโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นใยเป็นสำคัญ [1, 4]

### 2.1.2 โครงสร้างของเส้นใย

เส้นใยของพืชมีลักษณะเรียวยาว หัวท้ายปิด ลักษณะของเส้นใยมีการแปรผันตามอัตราการเจริญเติบโตและปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเส้นใยที่มีการเจริญเติบโตในช่วงฤดูฝนลักษณะของเส้นใยจะมีผนังเซลล์บางและลูเมนกว้าง ส่วนเส้นใยที่มีการเจริญเติบโตในฤดูแล้งนั้นผนังเซลล์ของเส้นใยจะหนาและลูเมนแคบ โครงสร้างของเส้นใยมีการแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นหลักๆ คือ ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella) ชั้นผนังเซลล์ (cell wall) และลูเมน (lumen) [1, 3, 5] ดังแสดงในภาพที่ 2-2




**ภาพที่** 2-2 โครงสร้างของเส้นใย [6]

#### 2.1.2.1 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella, M)

เป็นชั้นบริเวณนอกสุดของเส้นใยประกอบด้วยลิกนิน (Lignin) ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวประสานให้เส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมติดกันในเนื้อไม้ ชั้นมิดเดิลลาเมลลาไม่ได้เป็นส่วนของผนังเซลล์และมีขนาดบาง ดังแสดงในภาพที่ 2-3

**ภาพที่** 2-3 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (M) ของโครงสร้างเส้นใย [6]

#### 2.1.2.2 **ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย** (cell wall)

ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใยประกอบไปด้วย 2 ชั้นคือ ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) และชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall)

2.1.2.2.1 ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall, P) เป็นชั้นที่มีลักษณะบางมากเกิดจากเส้นใยขนาดย่อย (microfibril) เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ

2.1.2.2.2 ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall, S) เป็นชั้นที่ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้น $S_1$ ชั้น $S_2$ และ ชั้น $S_3$ ตามการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย โดยชั้น $S_1$ และ $S_3$ มีขนาดบางและการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยจะเรียงตัวตามแนวนอนเมื่อเทียบกับแกนของเซลล์ ส่วนชั้น $S_2$ เป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุดส่วนการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยจะเอียงทำมุมกับแกนของเซลล์

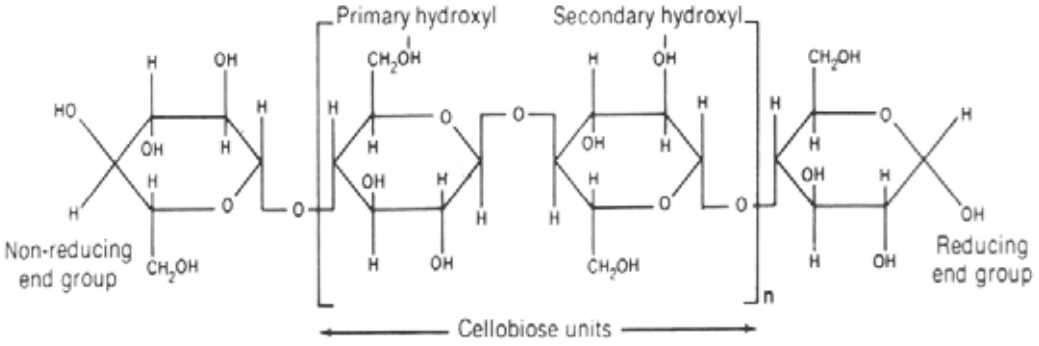
#### 2.1.2.3 **ลูเมน** (lumen)

มีลักษณะเป็นท่ออยู่กลางเส้นใย โดยอยู่ถัดจากผนังเซลล์เส้นใยชั้นที่ 2 หรือ 3 เข้าไป ลูเมนจะเป็นบริเวณที่ให้สารเคมีในกระบวนการต้มเยื่อซึมเข้ามาทำปฏิกิริยากับเส้นใย

### 2.1.3 **องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้**

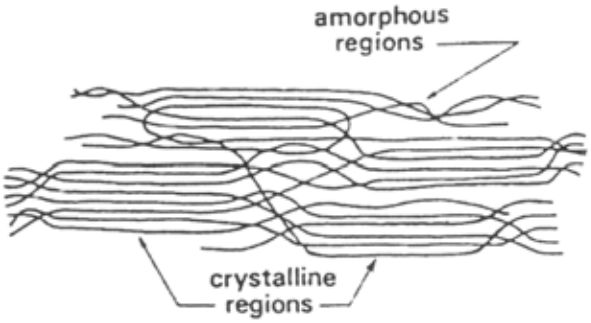
#### 2.1.3.1 **เซลลูโลส** (cellulose)

เซลลูโลส คือ คาร์บอไฮเดรตชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน และยังจัดเป็นพวกพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ชนิดหนึ่งด้วย เนื่องจากประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสจำนวนมากมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-(1-4) ไกลโคซิดิก ($\beta$-1,4 glycosidic bond) มีสายโซ่เป็นเส้นตรง (linear chain) โมเลกุลของกลูโคสจะเชื่อมต่อกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสโมเลกุลหนึ่งกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสโมเลกุลถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 2-4 สำหรับหน่วยย่อยพื้นฐานของเซลลูโลสจะเรียกว่า เซลโลไบโอส (cellobiose) ประกอบไปด้วยกลูโคส 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกัน ความยาวของสายโซ่โมเลกุล (degree of polymerization, DP) ของเซลลูโลส คือ จำนวนของหน่วยกลูโคสที่มาเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ พบว่าในเนื้อไม้ปกติมี DP ถึง 10,000 หน่วย [1-3]




**ภาพที่** 2-4 โครงสร้างของเซลลูโลส [6]

ในไม้ส่วนใหญ่จะมีเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 40-45 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง [2] โมเลกุลของเซลลูโลสจะมีการเรียงตัวรวมกลุ่มกันเป็นเส้นใยขนาดย่อย โดยบางส่วนจะมีการเรียงตัวแบบเป็นผลึก (crystalline region) คือ โมเลกุลมีการจัดเรียงกันอย่างหนาแน่น เป็นระเบียบ ทำให้สารเคมีหรือตัวทำละลายเข้าทำปฏิกริยาหรือซึมผ่านได้ยาก ในขณะที่บางส่วนของโมเลกุลมีการเรียงตัวแบบอสัณฐาน (amorphous region) คือ มีลักษณะไม่เป็นระเบียบ เรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ส่งผลให้เกิดการแทรกซึมของตัวทำละลายหรือสารเคมีได้ง่าย [6] ดังแสดงในภาพที่ 2-5

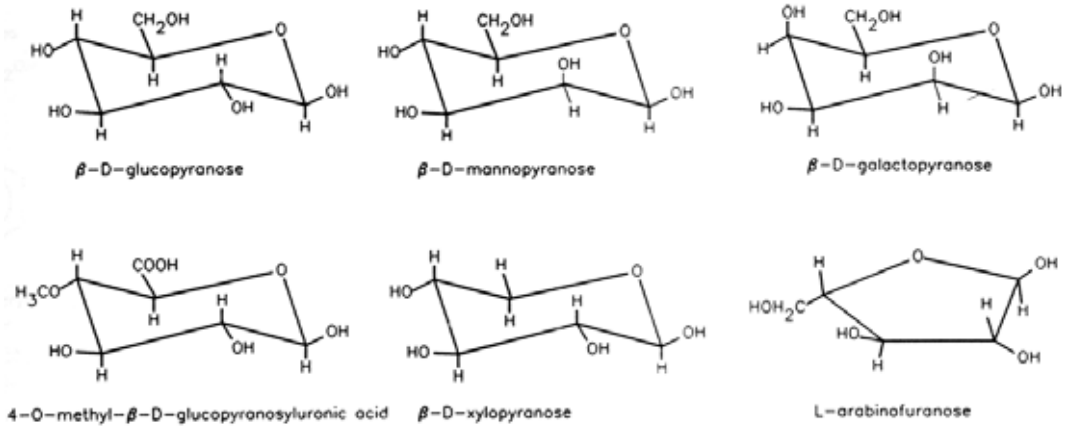



**ภาพที่** 2-5 บริเวณส่วนที่เป็นผลึก (crystalline regions) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous regions) ของเซลลูโลส [6]

### 2.1.3.2 **เฮมิเซลลูโลส** (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกับเซลลูโลส คือ ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน แต่ต่างกันที่เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด ได้แก่ กลูโคส (glucose) กาแลกโตส (galactose) แมนโนส (mannose) ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 6 อะตอม และไซโลส (xylose) กับอะราบิโนส (arabinose) ซึ่งเป็น

น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และอาจมีกรดกลูคูโรนิก (glucuronic) เป็นองค์ประกอบได้เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-6




**ภาพที่** 2-6 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส [2]

เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นแบบกิ่งก้านไม่เหมือนกับเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง มีการเรียงตัวเป็นแบบผลึกน้อย ส่วนมากจะมีการเรียงตัวเป็นแบบอสัณฐาน ส่งผลให้สารเคมีในการต้มเยื่อแทรกซึมได้ง่าย ดังนั้นเฮมิเซลลูโลสจึงถูกทำลาย (degradation) ได้ง่ายกว่าเซลลูโลส ส่วนความยาวสายโซ่โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะอยู่ในช่วง 100-200 ต่อเฮมิเซลลูโลส 1 โมเลกุล [1] เนื่องจากสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสมีความเป็นกิ่งก้าน (branching chain) มาก ทำให้เกิดพันธะกับเส้นใยอื่นได้ดี ส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวของเส้นใยกันมากขึ้นในการขึ้นแผ่นเป็นกระดาษ ดังนั้นเยื่อที่มีเฮมิเซลลูโลสสูงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษโดยเฉพาะความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความแข็งแรงต่อการหักพับของกระดาษ (folding endurance)

ส่วนที่เป็นคาร์บอไฮเดรตของเส้นใย คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จะถูกเรียกรวมกันว่าโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งโฮโลเซลลูโลสสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ตามการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนี้

- แอลฟาเซลลูโลส ($\alpha$-cellulose) เป็นส่วนที่เรียกว่า เซลลูโลสที่แท้จริง ไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้องได้ ในการผลิตเยื่อไม่สามารถแยกแอลฟาเซลลูโลสออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ และมักจะมีน้ำตาลแมนแนน (mannan) และกลูโคแมนแนน (glucomannan) ปนด้วยเสมอ เนื่องจากทั้งสองตัวนี้ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 เช่นกัน โดยแอลฟา

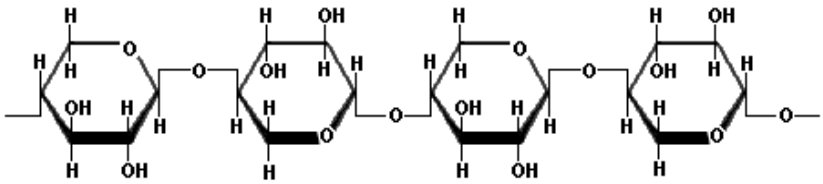
เซลลูโลสจะมีโมเลกุลของกลูโคสหรือ DP ตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป แอลฟาเซลลูโลสนั้นมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

- เบต้าเซลลูโลส (β-cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และจะตกตะกอนในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด เบต้าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในด่าง ค่า DP ของเบต้าเซลลูโลสจะอยู่ระหว่าง 100-200 หน่วย

- แกมม่าเซลลูโลส (γ-cellulose) เป็นเซลลูโลสซึ่งละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด แต่จะตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ ดังนั้นแกมม่าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่เป็นของเหลวในสารละลายด่าง ค่า DP ของแกมม่าเซลลูโลสจะต่ำกว่า 10 หน่วย

ไซแลน (xylan) (ภาพที่ 2-7) เป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสซึ่งพบในผนังเซลล์ของพืช โดยไซแลนจะยึดเกาะกับเฮมิเซลลูโลสชนิดอื่นและเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน โครงสร้างของไซแลนเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลดี-ไซโลส (D-xylose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β-1,4 xylosidic เป็นสายหลักและมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ หรือโอลิโกแซคคาไรด์สายสั้นมาเชื่อมต่อเป็นสายกิ่ง [2]

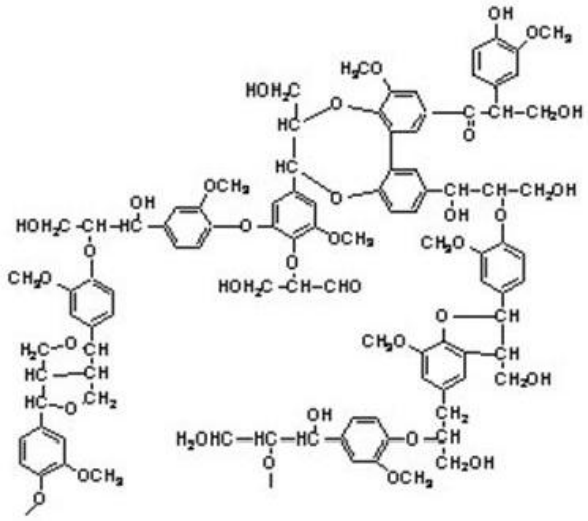
การย่อยสลายไซแลนให้เป็นน้ำตาลไซโลสสามารถย่อยสลายได้โดยสารเคมี (chemical hydrolysis) หรือการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) หรือการใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน โดยการย่อยสลายไซแลนด้วยเอนไซม์เป็นจะปฏิกิริยาที่จำเพาะเจาะจงกับสารตั้งต้นมากกว่า



**ภาพที่** 2-7 โครงสร้างของไซแลน [15]

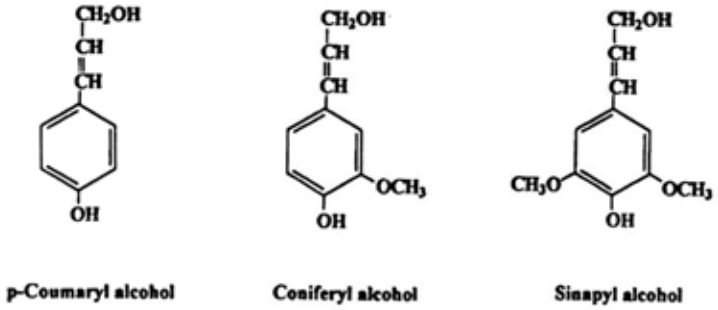
2.1.3.3 **ลิกนิน** (lignin)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ประมาณร้อยละ 17-33 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ด้วย ลิกนินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนดังแสดงในภาพที่ 2-8 ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เนื้อไม้ คือ มีหน้าที่เหมือนกาวหรือตัวยึดทำให้เส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมติดกันและช่วยต้านทานการทำลายจากพวกจุลินทรีย์ไม่ให้เนื้อไม้เกิดการเสื่อมสลาย ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบสามมิติ ประกอบด้วยหน่วยของเฟนิลโพรเพน (phenylpropane unit) มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบหรืออสัณฐาน มีความเข้มข้นมากบริเวณมิดเดิลลาเมลลา มีอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature) หรืออุณหภูมิที่เกิดการอ่อนตัว (softening temperature) ที่ประมาณ 130-150 องศาเซลเซียส [3]



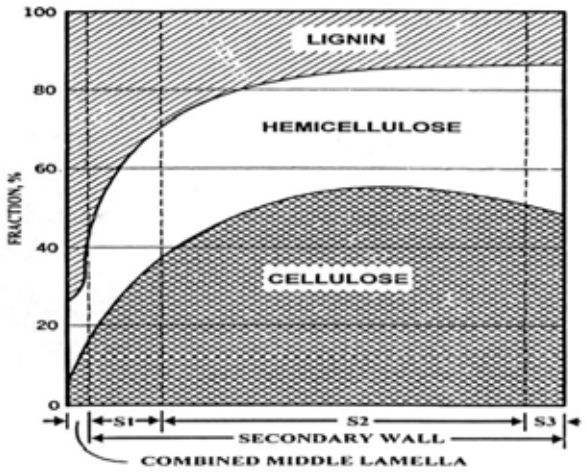
**ภาพที่** 2-8 โครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้ (Courtesy of Espere) [7]

มอโนเมอร์ (monomer) พื้นฐานที่พบของลิกนินมี 3 รูปแบบคือ แบบ p-coumaryl alcohol แบบ coniferyl alcohol และแบบ sinapyl alcohol ดังแสดงในภาพที่ 2-9 โดยในหญ้าหรือลำต้นของพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (non wood plant) จะพบโมโนเมอร์ทั้งสามแบบ ส่วนในไม้เนื้อแข็ง (hard wood) จะพบโมโนเมอร์แบบ coniferyl alcohol ร้อยละ 50-75 และแบบ sinapyl alcohol ร้อยละ 25-50 ส่วนไม้เนื้ออ่อนจะพบแบบ coniferyl alcohol เพียงอย่างเดียว [1, 3]




**ภาพที่** 2-9 หน่วยโครงสร้างหลักของลิกนิน [3]

สำหรับการผลิตเยื่อแบบเคมีนั้น ลิกนินคือสิ่งที่ไม่ต้องการและจะมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ออกจากไม้ เพราะลิกนินเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ไปขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใยในกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่ำ และหากมีปริมาณสูงจะส่งผลให้กระดาษมีสีเหลือง [4]




**ภาพที่** 2-10 องค์ประกอบทางเคมีของชั้นผนังเซลล์เส้นใย [5]

องค์ประกอบทางเคมีของชั้นผนังเซลล์จะมีการแปรผันตามปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ดังแสดงในภาพที่ 2-10 โดยพบว่าปริมาณความเข้มข้นของลิกนินจะมีมากสุดที่ชั้นมิดเดิลลาเมลลา และต่ำสุดในชั้น $S_2$ และ $S_3$ ส่วนชั้น $S_2$ จะมีปริมาณเซลลูโลสสูงสุด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากชั้น $S_2$ เป็นชั้นที่หนาที่สุดจึงมีปริมาณลิกนินอยู่มากที่สุด [1, 5]

2.1.3.4 **สารแทรก** (extractives)

สารแทรกเป็นสารที่มีความหลากหลาย แทรกอยู่เป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดสี กลิ่น รส ในเนื้อไม้ และมีหน้าที่ตามแต่ชนิดของสารนั้นในเนื้อไม้ เช่น ทำหน้าที่ป้องกันการเสื่อมสลายของไม้ เป็นต้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ สารแทรกที่ละลายน้ำได้และสารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ สารแทรกอาจส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษได้ เช่น ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อหรือฟอกเยื่อมากขึ้น อาจทำให้เกิดตะกรันตามท่อหรืออุปกรณ์ในระบบการผลิต เกิดฟองมากขึ้นในระหว่างการล้างเยื่อ ทำให้เยื่อล้างสะอาดยากขึ้น และอาจทำให้เกิดพวกยางเหนียว (stickies) ทำให้กระดาษขาด รบกวนการเดินกระดาษและทำให้กระดาษเสียหายได้

2.1.4 **ข้าวโพด**

ข้าวโพดเป็นพืชไร่ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและเป็นธัญญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้นานานับประการ ซึ่งอาจสรุปได้พอสังเขปดังนี้

- ใช้เป็นอาหารสัตว์ ได้ทั้งเมล็ด ต้นสด ต้นแก่หลังการเก็บเกี่ยว ต้นสดหมัก กากน้ำตาล กากแป้งที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน

- ใช้เป็นอาหารมนุษย์ ในอเมริกากลางและอเมริกาใต้บริโภคข้าวโพดเป็นอาหารหลัก โดยนำเมล็ดแก่มาบดให้เป็นแป้งเพื่อทำเป็นอาหาร สำหรับประเทศไทยนิยมนำฝักสดของข้าวโพดหวาน ข้าวโพดข้าวเหนียวมาต้มรับประทาน และนำฝักอ่อนของข้าวโพดมาประกอบอาหาร และบรรจุกระป๋องในระดับอุตสาหกรรมเพื่อส่งขายต่างประเทศอีกด้วย

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เมล็ดข้าวโพดนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาล น้ำเชื่อม น้ำมัน แอลกอฮอล์ ยารักษาโรค เป็นต้น ส่วนฝัก ใบ และลำต้นข้าวโพดนำไปทำผลิตภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ กระดาษ ปุ๋ย ฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น [1]

2.1.4.1 **ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโพด**

ข้าวโพดเป็นพืชตระกูลหญ้า ซึ่งอยู่ในวงศ์เดียวกับหญ้า ไม้ไผ่ และธัญพืชอื่นๆ คือ อยู่ในวงศ์ Poaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Zea may* Linn. มีลำต้นตั้งตรง มีปล้อง ใบ

เรียวยาวติดอยู่กับต้นบริเวณปล้อง ฝักจะออกบริเวณกลางลำต้นตรงข้อ มีช่อดอกที่ปลายยอด ข้าวโพดมี ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ดังต่อไปนี้

2.1.4.1.1 ราก ข้าวโพดมีรากเป็นระบบรากฝอย การเกิดรากของข้าวโพดจะมีลำดับการเจริญเติบโตเริ่มจากมีรากชั่วคราวซึ่งเป็นรากแรกเกิด อีก 7-10 วัน ก็จะเกิดรากถาวร [8-12] ซึ่งเป็นรากที่เจริญออกไปรอบๆ ต้นข้าวโพดและจะแทงลึกลงไปในดินเพื่อหาอาหาร นอกจากนี้ ยังมีรากที่เกิดขึ้นที่รอบๆ ข้อใกล้กับพื้นดินอีกด้วย ซึ่งรากนี้จะช่วยในการพยุงลำต้นหรือยึดพื้นดิน

2.1.4.1.2 ลำต้น ข้าวโพดมีลำต้นแข็ง ไส้แน่นไม่กลวงเหมือนพืชอื่น ความสูงของลำต้นมีตั้งแต่ 60 เซนติเมตร จนถึง 6 เมตร แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ ข้อของข้าวโพดนอกจากเป็นข้อต่อของปล้องแล้วยังเป็นที่เกิดของราก ลำต้นใหม่และฝักอีกด้วย ปล้องที่โคนต้นจะสั้นและหนา และยาวขึ้นไปทางด้านปลาย ปล้องเหนือพื้นดินมีตั้งแต่ 8-20 ปล้อง เมื่อผ่าลำต้นดูตามขวางจะเห็นเปลือกอยู่วงรอบนอก ประกอบด้วยเซลล์ที่กันน้ำได้ ส่วนด้านในเป็นเซลล์ท่อน้ำและท่ออาหาร บริเวณไส้ตรงกลาง (pith) ของลำต้นมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ

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

2.1.4.1.4 ดอก ข้าวโพดมีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่แยกกัน แต่อยู่ในต้นเดียวกัน ช่อดอกตัวผู้อยู่ส่วนยอดของลำต้น ส่วนช่อดอกตัวเมียอยู่ต่ำลงมาโดยอยู่ระหว่างกาบของใบและลำต้น ฝักเกิดจากดอกตัวเมียที่เจริญเติบโตแล้ว ฝักอ่อนจะมีสีเขียว พอแก่จะมีสีนวล

**2.1.4.2 การจำแนกชนิดของข้าวโพด**

จำแนกตามคุณสมบัติของแป้งในเมล็ด ภายในเมล็ดข้าวโพดประกอบด้วยแป้ง 2 ชนิดคือ แป้งแข็ง (hard starch) และแป้งอ่อน (soft starch) จึงสามารถจำแนกโดยอาศัยตำแหน่งของแป้งแต่ละชนิดและลักษณะของเปลือกหุ้มเมล็ด [8-12] ได้เป็น 7 ชนิด คือ

2.1.4.2.1 ข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุบ (dent corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* var. *indentata* เป็นข้าวโพดที่เมล็ดตอนบนมีรอยบุบสีขาว เนื่องจากตอนบนเป็นแป้ง

ชนิดอ่อน (soft starch) เมื่อตากให้แห้ง ส่วนที่เป็นแป้งอ่อนจึงหดยุบตัวและเกิดลักษณะหัวบุบดังกล่าว มีลำต้นสูงตั้งแต่ 2.5-4.5 เมตร ฝักยาวตั้งแต่ 15-30 เซนติเมตร และมีเมล็ดระหว่าง 8-24 แถว

2.1.4.2.2 ข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง (flint corn) มีชื่อทางวิทยาศาตร์ว่า *Zea mays* var. *indurata* เป็นข้าวโพดที่มีลักษณะเมล็ดค่อนข้างแข็งแรง กลม เรียบ หัวไม่บุบ เพราะมีแป้งชนิดอ่อนอยู่ตรงกลาง แต่ด้านนอกถูกห่อหุ้มด้วยแป้งชนิดแข็ง เมื่อตากให้แห้งจึงไม่หดตัว มีขนาดฝักและจำนวนแถวน้อยกว่าชนิดหัวบุบ

2.1.4.2.3 ข้าวโพดหวาน (sweet corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* var. *saccharata* เป็นข้าวโพดปลูกรับประทานฝักสดโดยเฉพาะ เมล็ดเมื่ออ่อนจะมีลักษณะใส โปร่งแสง และมีรสหวานเนื่องจากมีน้ำตาลมาก เมื่อเมล็ดแก่จะหดตัวและเหี่ยวย่น

2.1.4.2.4 ข้าวโพดคั่ว (pop corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* var. *everta* เมล็ดมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีแป้งประเภทแข็งอยู่ภายใน ภายนอกถูกห่อหุ้มด้วยสารที่ค่อนข้างเหนียวและยืดตัวได้ ฉะนั้นเมื่อเมล็ดที่มีความชื้นอยู่ภายในพอสมควรถูกความร้อน จะเกิดแรงดันภายในเมล็ดและเมื่อถึงขีดสุดก็จะระเบิดตัวออกมา

2.1.4.2.5 ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* var. *certain* มีลักษณะเมล็ดเหนียวคล้ายขี้ผึ้ง ซึ่งเป็นแป้งที่มีลักษณะคล้ายแป้งมันสำปะหลัง ปลูกกันเล็กน้อยในสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้ทำแป้งที่มีคุณภาพคล้ายแป้งมันดังกล่าว

2.1.4.2.6 ข้าวโพดแป้ง (flour corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* var. *amylacea* เมล็ดประกอบด้วยแป้งชนิดอ่อนมาก มีรูปร่างและลักษณะเมล็ดคล้ายข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง แต่หัวไม่บุบหรือบุบเล็กน้อยโดยสม่ำเสมอทั่วเมล็ด มีเมล็ดประมาณ 8-12 แถว

2.1.4.2.7 ข้าวโพดป่า (pod corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* var. *tunicate* เป็นข้าวโพดที่มีลักษณะแปลก ใกล้เคียงกับพืชป่า เมล็ดมีเปลือกหุ้มทุกเมล็ด และยังมีเปลือกฝักอีกชั้นหนึ่ง ส่วนเมล็ดมีลักษณะต่างๆ กัน คือมีทั้งพวกหัวบุบ หัวแข็ง ข้าวโพดแป้ง ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว

### 2.1.4.3 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพด

เส้นใยจากลำต้นข้าวโพดมีขนาดความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.0-1.5 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นเส้นใยที่มีขนาดสั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง พบว่า เส้นใยของลำต้นข้าวโพดมีความยาวเฉลี่ยใกล้เคียงกับเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง แต่มีขนาดสั้นกว่าเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน ส่วนความกว้างของเส้นใยจากลำต้นข้าวโพดมีความกว้างน้อยกว่าเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 2-1 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพด พบว่าข้าวโพดมีปริมาณเซลลูโลส และเพนโตซาน (pentosan) ในปริมาณมาก ส่วนปริมาณลิกนินมีน้อยเมื่อเทียบกับไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 2-2 ฉะนั้นจึงเห็นได้ว่าลำต้นข้าวโพดมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการผลิตเยื่อกระดาษได้เช่นเดียวกับพืชที่มีเนื้อไม้ [13]

**ตารางที่** 2-1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ [13]

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

**ตารางที่** 2-2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ [13]

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

### 2.1.5 **กระบวนการผลิตเยื่อ** (pulping process)

การผลิตเยื่อ คือ กระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยจากชิ้นไม้ให้กลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (individual fiber) โดยการแยกเส้นใยนั้นอาจมีการเอาลิกนินหรือไม่เอาลิกนินออกจากชิ้นไม้ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อนำเส้นใยที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ [4] โดยกระบวนการผลิตเยื่อแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้

#### 2.1.5.1 **กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล**

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

#### 2.1.5.2 **กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี**

เป็นการใช้วิธีการผลิตเยื่อเคมีร่วมกับการผลิตเยื่อเชิงกล โดยใช้สารเคมีเพื่อทำให้ชิ้นไม้มีการอ่อนตัวหรือละลายลิกนินบางส่วนออก แล้วทำการแยกเส้นใยโดยใช้แรงกล จึงทำให้ผลผลิตเยื่อและคุณสมบัติของเยื่อที่ได้อยู่ระหว่างเยื่อแบบเคมีและแบบเชิงกล โดยผลผลิตเยื่อกึ่งเคมีมีค่าประมาณร้อยละ 55-90 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เส้นใยไม่มีความยืดหยุ่น (flexible) เท่ากับเยื่อเคมี แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าเยื่อเชิงกล ส่งผลให้เส้นใยมีการสร้างพันธะได้ดีกว่าจึงทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อเชิงกล การผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมีมีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่ค่อนข้างมากและมักจะไม่นิยมนำมาฟอกเยื่อให้มีความขาวสว่างมากนักเนื่องจากทำให้ขาวได้ยากและสิ้นเปลืองสารเคมี [5, 6]

#### 2.1.5.3 **กระบวนการผลิตเยื่อเคมี**

เป็นกระบวนการใช้สารเคมีละลายลิกนินภายในเนื้อไม้ออกเพื่อทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน อย่างไรก็ตามสารเคมีไม่เพียงแต่ละลายลิกนินเท่านั้น แต่ละลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกมาด้วย ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อที่ได้จากวิธีนี้มีค่าประมาณ 40-50% เยื่อเคมีที่ผลิตได้ส่วนมากสามารถนำไปทำการฟอกเยื่อต่อได้ง่าย เนื่องจากปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่น้อย เยื่อที่ผลิตได้มีโอกาสกลับมาเป็นสีเหลือง (yellowing and brightness reversion) ต่ำกว่า

เยื่อที่ผลิตจากเยื่อเชิงกล นอกจากนี้เยื่อเคมียังทำให้กระดาษมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากความสมบูรณ์และความยาวของเส้นใยของเยื่อเคมีสูงกว่าเส้นใยของเยื่อเชิงกล

### 2.1.6 **การฟอกเยื่อ** (bleaching)

การฟอกเยื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อในด้านความขาวสว่าง (brightness) เนื่องจากเนื่องที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อมักจะมีความขาวสว่างไม่สูงนัก โดยการเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อทำได้โดยการเปลี่ยนสารที่มีสีให้เป็นสารที่ไม่มีสี การกำจัดลิกนินออกจากเยื่อและการกำจัดสารแทรกออกจากเยื่อ

#### 2.1.6.1 **กระบวนการฟอกเยื่อ**

การฟอกเยื่อสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.1.6.1.1 การฟอกลิกนิน (lignin bleaching)

เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนโครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ที่อยู่ในลิกนิน ให้ไม่สามารถเกิดเป็นสีเหลืองขึ้นได้ วิธีนี้ลิกนินไม่ได้ถูกกำจัดออกไป เป็นวิธีที่มักใช้กับเยื่อเชิงกลที่มีลิกนินเหลืออยู่มาก ข้อดีคือ ผลผลิตเยื่อ (pulp yield) หลังการฟอกเยื่อไม่ลดลง แต่เยื่อสามารถกลับมามีสีเหลืองได้อีกครั้งเมื่อสัมผัสกับแสงแดดหรือความชื้น

2.1.6.1.2 การกำจัดลิกนิน (lignin removal)

เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับเยื่อเพื่อกำจัดลิกนินออก เป็นวิธีที่ทำให้เยื่อมีความขาวสว่างที่คงทน มักใช้กับเยื่อเคมีซึ่งลิกนินถูกกำจัดไปบางส่วนแล้ว ข้อดีคือ ไม่ทำให้เยื่อกลับมามีสีเหลืองอีกเมื่อสัมผัสกับแสงแดดและความชื้น แต่จะทำให้ผลผลิตเยื่อหลังการฟอกลดลง [4]

#### 2.1.6.2 **ขั้นตอนการฟอกเยื่อ**

การฟอกเยื่อประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การผสม การเกิดปฏิกิริยา และการล้าง [6] ดังต่อไปนี้คือ

2.1.6.2.1 การผสม (mixing) เป็นการผสมเยื่อกับสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อและอาจมีการใช้ไอน้ำเพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสม

2.1.6.2.2 การเกิดปฏิกิริยา (reaction) เป็นการปล่อยให้สารเคมีและเยื่อทำปฏิกิริยากันหลังจากการผสม โดยระดับการฟอกจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณสารเคมีที่ใช้และอุณหภูมิที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

2.1.6.2.3 การล้าง (washing) เป็นขั้นตอนหลังการเกิดปฏิกิริยา ถือได้ว่ามีความสำคัญเนื่องจากเป็นการเอาลิกนินที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วออกจากเยื่อ เป็นการแยกสารเคมีส่วนเกินและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีออกจากเยื่อที่ฟอกแล้ว

**2.1.6.3 ลำดับการฟอกเยื่อ**

รายละเอียดเกี่ยวกับลำดับการฟอกเยื่อ มีดังนี้คือ

2.1.6.3.1 การฟอกแต่ละขั้นตอนโดยใช้สารเคมีต่อเนื่องกัน โดยการใช้สารเคมีแต่ละตัวจะคั่นด้วยขั้นตอนการล้างก่อนเข้าสู่สารเคมีตัวถัดไป ให้เขียนตัวย่อต่อกันไปตามลำดับของสารเคมีที่ใช้ เช่น CEDED ซึ่งอักษรย่อภาษาอังกฤษแต่ละตัวจะแสดงถึงสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ ดังแสดงในตารางที่ 2-3

2.1.6.3.2 หากมีการใช้สารเคมี 2 ชนิดผสมกันก่อนเติมหรือเติมพร้อมๆ กันในขั้นตอนการฟอกเยื่อเดียวกัน ให้ใช้เครื่องหมายบวก (+) ระหว่างสารเคมีสองตัวนั้น และให้ใส่วงเล็บสำหรับสารเคมีสองตัวนั้น โดยจะเขียนสารเคมีที่ใช้ในปริมาณมากกว่าขึ้นก่อน เช่น (C+D)EDED

2.1.6.3.3 หากมีการใช้สารเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในขั้นตอนการฟอกเยื่อเดียวกัน โดยที่มีการกวนหรือผสมหลังจากที่ใส่สารเคมีตัวแรกลงไปและก่อนที่จะเติมสารเคมีอีกตัวหนึ่งที่เหลือ ให้เขียนสัญญลักษณ์เป็น สารเคมีสองตัวติดกันในเครื่องหมายวงเล็บ โดยเขียนสารเคมีที่ใส่เป็นตัวแรกขึ้นก่อน เช่น (CD)EDED

2.1.6.3.4 จากข้อ 2.1.6.3.3 หากต้องการแสดงอัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ด้วย จะเขียนตัวเลขตามหลังตัวอักษรที่ใช้แทนสารเคมีดังกล่าว เช่น (D70C30) แปลว่า เติมคลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide, $ClO_2$) ร้อยละ 70 และเติมคลอรีน (chlorine, $Cl_2$) ร้อยละ 30 ต่อเนื่องกันในขั้นตอนการฟอกเยื่อเดียวกัน

### 2.1.6.4 **สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ**

ตารางที่ 2.3 แสดงรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้มีการฟอกเยื่อ รวมถึงสัญญลักษณ์ตัวอักษรที่ใช้แทนสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

**ตารางที่** 2-3 สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ [4]

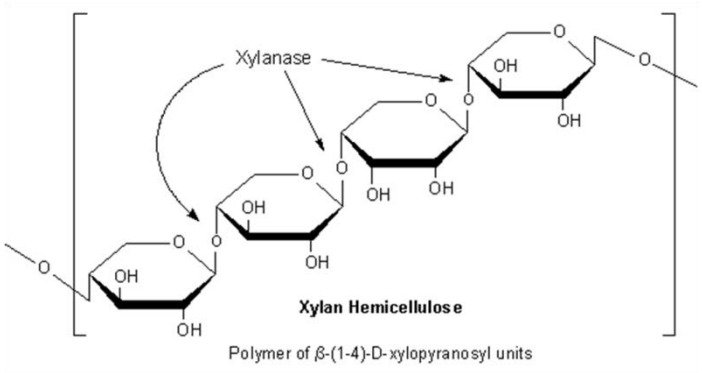
| สารเคมี | สัญญลักษณ์ | หน้าที่ | ชนิดเยื่อ | ข้อดี | ข้อเสีย |
|---|---|---|---|---|---|
| Chlorine ($Cl_2$) | C | ออกซิไดซ์ ลิกนิน คลอรีเนท ลิกนิน | เคมี | ใช้งานง่าย ราคาถูก | มีสารก่อมะเร็ง |
| Chlorine dioxide ($ClO_2$) | D | ออกซิไดซ์ลิกนิน ทำให้เยื่อขาวขึ้น | เคมี | มีประสิทธิภาพให้เยื่อขาวและสะอาด | ราคาแพง |
| Hypochlorite (NaOCl) | H | ออกซิไดซ์ลิกนิน ทำให้เยื่อขาว | เคมี | ใช้งานง่าย | ทำให้ความแข็งแรงของเยื่อลดลง |
| Hydrogen peroxide ($H_2O_2$) | P | ออกซิไดซ์ลิกนิน ทำให้ลิกนินไม่มีสี | เคมีและเชิงกล | ใช้งานง่าย ราคาถูก | เยื่อไม่ค่อยสะอาด |
| Hydrosulfite ($Na_2S_2O_4$) | Y | รีดิวซ์ลิกนิน ทำให้เยื่อขาวขึ้น | เชิงกล | ใช้งานง่าย ราคาถูก | ประสิทธิภาพการใช้งานจำกัด |
| Chelant (EDTA or DTPA) | Q | กำจัดไอออนของโลหะ | เคมี | มีประสิทธิภาพในการใช้งาน | ราคาแพง |
| Oxygen ($O_2$) | O | ออกซิไดซ์ลิกนิน ละลายลิกนิน | เคมี | ราคาถูก | Reactor มีราคาแพง ทำให้ความแข็งแรงของเยื่อลดลง |
| Ozone ($O_3$) | Z | ออกซิไดซ์ลิกนิน ทำให้เยื่อขาวขึ้น | เคมี | มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน | ควบคุมยาก |
| Sodium hydroxide(NaOH) | E | ละลายลิกนิน | เคมี | ใช้งานง่าย ราคาถูก | ทำให้เยื่อเกิดสีดำ |

### 2.1.6.5 **การฟอกเยื่อแบบชีวภาพ** (biobleaching)

การฟอกเยื่อแบบชีวภาพ คือ การใช้เอนไซม์ช่วยในการฟอกเยื่อ หรืออาจเรียกการใช้เอนไซม์ช่วยในการฟอกเยื่อนี้ว่า Bleach boosting โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ เพื่อทำให้ความขาวสว่างของเยื่อสูงขึ้นและเพื่อช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเอนไซม์สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ [2]

### 2.1.7 **เอนไซม์ไซแลนเนส** (xylanase)

ไซแลนเนสเป็นเอนไซม์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริการย่อยสลายไซแลน เนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสมีการสร้างพันธะกันแบบโควาเลนต์ (covalent bond) กลายเป็นสารประกอบลิกนินคาร์โบไฮเดรต (lignin carbohydrate complex) โดยไซแลนเนสจะไปตัดสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลน (น้ำตาลไซโลส) ที่ตำแหน่ง 1, 4-β-D-xylosidic linkages ในสายหลักของไซแลนแบบสุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2-11 ทำให้สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ง่ายขึ้น




**ภาพที่** 2-11 การเข้าไปทำปฏิกิริยาของไซแลนเนสในโครงสร้างที่เป็นสารประกอบลิกนินคาร์บอไฮเดรต [16]

การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อกระดาษเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะนอกจากเอนไซม์ไซแลนเนสจะเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อแล้ว ยังช่วยลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เอนไซม์ไซแลนเนสยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติอีกด้วย

กลไกการทำงานของเอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อยังไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่นอน [4] แต่กลไกที่เป็นไปได้ คือ เอนไซม์ไซแลนเนสจะเข้าไปตัดสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลนออก ทำให้สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ง่ายขึ้น

### 2.1.8 **เอนไซม์แลกเคส** (laccase)

แลกเคสเป็นเอนไซม์ในกลุ่มโพลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidases) ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายลิกนินโดยตรง โดยจะมีตำแหน่งที่มีทองแดงอยู่หลายโมเลกุล (copper-containing enzyme) ซึ่งในการทำงานจะต้องจับประสานกับคอปเปอร์ไอออนแล้วเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของสารประกอบฟีนอลิก (phenolic) และอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine) แลกเคสสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของหนึ่งอิเล็กตรอนจากสับสเตรต (substrate) ที่เป็นสารอะโรมาติกหลายชนิดและมีสับสเตรตในช่วงกว้างมาก เอนไซม์ชนิดนี้สามารถกระตุ้นให้เกิดการออกซิไดซ์ (oxidise) หนึ่งอิเล็กตรอนจากหมู่ฟีนอล (phenol) อะนิลีน (aniline) และอะโรมาติกไธออล (aromatic thiol) ให้อยู่ในรูปสารอนุมูลอิสระ แล้วต่อด้วยปฏิกิริยาการตัดหรือต่อสายพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม เอนไซม์แลกเคสจะทำปฏิกิริยากับลิกนินตรงบริเวณโครงสร้างที่เป็นฟีนอลิก (phenolic structure) เท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้ตัวมีดีเอเตอร์ (mediator) เพื่อช่วยในการเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างฟีนอลิก (non-phenolic structure) ซึ่งตัวมีดีเอเตอร์ คือ โมเลกุลขนาดเล็กที่แสดงพฤติกรรมเป็นตัวนำพาอิเล็กตรอน (electron shuttle) ระหว่างแลกเคสและสารตั้งต้น

## 2.2 **เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

Shatalov และคณะ [17] ศึกษาผลของการใช้ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อยูคาลิปตัสที่ผลิตด้วยกระบวนการคราฟต์ พบว่าการใช้ไซแลนเนสทำให้ความขาวสว่างของเยื่อเพิ่มขึ้น 1.2-1.5% และการเกิดปฏิกิริยากำจัดลิกนินออก (delignification) ของเยื่อเพิ่มขึ้น 7-10% ค่าความขาวสว่างและสมบัติอื่นๆ ของเยื่อเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อทำการปรับสภาพเยื่อด้วยไซแลนเนสและฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงหนึ่งครั้ง โดยใช้ขั้นตอนการฟอกเยื่อ 3 ขั้นตอน แบบ XQP เมื่อ X แทนขั้นตอนที่ใช้ไซแลนเนส Q แทนขั้นตอนที่ใช้สาร Chelating agent และ P แทนขั้นตอนที่ฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Jiménez และคณะ [18] ศึกษาการฟอกเยื่อจากฟางข้าวสาลี (wheat straw) ด้วยวิธีชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ที่มีชื่อทางการค้าว่า cartazyme และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าทำให้ผล

ผลิตเยื่อ ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (kappa number) และความหนืดของเยื่อลดลง หากแต่ทำให้ความขาวสว่าง ค่าระยะขาด (breaking length) ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) และดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ของกระดาษเพิ่มขึ้น

Bissoon และคณะ [19] ศึกษาการฟอกเยื่อจากชานอ้อย (bagasse) ที่ผลิตด้วยวิธีโซดา โดยใช้ไซแลนเนสจาก *Thermomyces lanuginosus* พบว่าทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง และช่วยลดปริมาณการใช้สารฟอกเยื่อคลอรีนไดออกไซด์ ($ClO_2$) ลง

Camarero และคณะ [20] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยากำจัดลิกนินออกของเยื่อโดยใช้แลกเคสและตัวมีดีเอเตอร์ธรรมชาติร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น 15% และปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง

Ninawe และคณะ [21] ศึกษาการฟอกเยื่อจากฟางข้าวสาลี (wheat straw) ซึ่งผลิตด้วยวิธีโซดาโดยใช้ไซแลนเนสจาก *Streptomyces cyaneus* SN32 พบว่าการใช้ไซแลนเนส 10 IU/g ร่วมกับสารฟอกเยื่อไฮโปคลอไรท์ (hydrochlorite) ร้อยละ 6 ของน้ำหนักเยื่อแห้งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฟอกเยื่อสูงที่สุด ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง ความขาวสว่างเพิ่มขึ้น และยังช่วยปรับปรุงสมบัติของกระดาษในด้านอื่นๆ อีกด้วย

สุธิดา มุลาลินน์ [22] ศึกษาการฟอกเยื่อจากหญ้าคาและหญ้าแฝกด้วยไซแลนเนส พบว่าการฟอกเยื่อด้วยไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษสูงกว่าการใช้ไซแลนเนสหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว

# บทที่ 3

# วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

### 3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. ลำต้นข้าวโพด จากจังหวัดเชียงใหม่ (*Zea mays* var. *saccharata*)

2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 99% Merck KGaA, Germany

3. เอนไซม์ไซแลนเนส จาก *Aureobasidium pullulans*

4. เอนไซม์แลกเคส จาก *Pynoporus coccineus*

5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, $H_2O_2$) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท Poch, Poland

6. โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate, $Na_2SiO_3$) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท Merck KGaA, Germany

7. กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, $H_2SO_4$) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท Merck KGaA, Germany

### 3.1.2 เครื่องมือ

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

2. เครื่องชั่ง ทศนิยม 3 ตำแหน่ง (0.005-4,000 g); รุ่น TB-4002, Denver Instrument, Germany

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

4. ตู้อบ (hot air oven); Venticell, Germany

5. เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester); Universal Engineering, India

6. เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator); Adirondack Machine Corporation, USA

7. เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (fiber quality analyzer, FQA); Optest Equipment Inc., Canada

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

9. เครื่องวัดค่าสภาพระบายน้ำ (freeness tester); รุ่น LTDA, Regmed Industria Technica de Frecisao, Brazil

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

11. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath); รุ่น WB29 บริษัท Memmert, Germany

12. เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); Frank, Germany

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

14. เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (elmendolf tearing resistance tester); รุ่น Protear, Thwing-Albert Instrument, USA

15. เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง; รุ่น Color Touch PC, Technidyne Corporation, USA

16. กระบอกตวงขนาด 25, 100, 1000 มิลลิลิตร

17. บีกเกอร์ขนาด 25, 50, 250, 500 มิลลิลิตร

18. เทอร์โมมิเตอร์

19. แท่งแก้วคนสาร

20.ถุงพลาสติกแบบปิดปากถุงได้

## 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: การหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพดด้วยวิธีโซดา

3.2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำต้นข้าวโพดที่ทำการลอกเปลือกและทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว มาทำการตัดเป็นท่อนเล็กๆ ขนาดท่อนละประมาณ 1 นิ้ว โดยตัดส่วนที่เป็นข้อของลำต้นข้าวโพดทิ้ง จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง คำนวณหาความชื้นของชิ้นไม้ตามมาตรฐาน TAPPI T 258 om-02 [24]

3.2.1.2 การผลิตเยื่อแบบโซดาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพด

นำชิ้นต้นข้าวโพดมาทำการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาด้วยเครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับร้อยละ 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง และใช้ภาวะในการต้มเยื่อ คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที (ภาพที่ 3-1)

**ภาพที่ 3-1** เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester)

นำเยื่อที่ได้หลังการผลิตเยื่อมาล้างให้สะอาด และทำการคัดกรองเพื่อแยกส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (reject) ออก นำส่วนที่เป็นเยื่อมาปั่นแห้งให้เยื่อหมาด ชั่งน้ำหนักเยื่อรวมที่

ได้ทั้งหมดแล้วแบ่งเยื่อออกมาหาปริมาณความชื้นของเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 258 om-02 เพื่อใช้คำนวณหาร้อยละของผลผลิตของเยื่อ (% pulp yield) จากนั้นเก็บเยื่อใส่ถุงและปิดปากถุง นำไปแช่ตู้เย็นเพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป นำส่วนที่ไม่เป็นเยื่อทั้งหมดมาอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งหาน้ำหนักแห้ง นำน้ำหนักที่ได้เปรียบเทียบกับน้ำหนักชิ้นไม้แห้งทั้งหมดที่ใส่ลงไปเพื่อคำนวณหาร้อยละส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (% reject)

3.2.1.3 การบดเยื่อ (beating)

นำเยื่อที่ผ่านการต้มเยื่อของแต่ละภาวะมาบดเยื่อโดยใช้เครื่องบดเยื่อ (valley beater) ดังแสดงในภาพที่ 3-2 ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [24] โดยคำนวณชั่งเยื่อข้าวโพด 360 กรัมน้ำหนักแห้ง ใส่ลงเครื่องบดเยื่อ คำนวณน้ำที่ต้องเติมให้มีปริมาตรรวมทั้งหมด 23 ลิตร โดยร้อยละความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) จะเท่ากับ 1.56 เปิดเครื่องโดยไม่แขวนตุ้มน้ำหนักเพื่อให้เยื่อกระจายเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบ 5 นาทีแล้ว ทำการบดเยื่อโดยแขวนลูกตุ้มน้ำหนักของเครื่องบดเยื่อ ทำการบดเยื่อเพื่อให้ได้ค่าสภาพระบายน้ำ (freeness) ของเยื่อข้าวโพดในช่วง 300±50 มิลลิลิตร โดยในการทดลองนี้จะใช้เวลาประมาณ 4 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บน้ำเยื่อไว้ขึ้นแผ่นและวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยหลังการบดเยื่อ รวมถึงหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการบดเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 [25]

**ภาพที่** 3-2 เครื่องบดเยื่อ (valley beater)

3.2.1.4 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

3.2.1.4.1 สภาพระบายน้ำของเยื่อ (freeness) คือ ความสามารถในการระบายน้ำ (drainage) ของเส้นใย หรือการอุ้มน้ำของเส้นใย โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 [25] มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดสภาพระบายน้ำของเยื่อ (freeness tester) แสดงในภาพที่ 3-3 ถ้าค่าความเป็นอิสระของเยื่อสูง แสดงว่าการระบายน้ำของเยื่อเร็ว การอุ้มน้ำของเส้นใยมีน้อย แต่ถ้าค่าความเป็นอิสระของเยื่อต่ำ แสดงว่าการระบายน้ำของเยื่อช้า การอุ้มน้ำของเส้นใยสูง

**ภาพที่ 3-3** เครื่องวัดความสภาพระบายน้ำของเยื่อ (freeness tester)

3.2.1.4.2 ปริมาณด่างที่เหลือ (residual alkali) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณด่างที่เหลือของน้ำดำ (black liquor) หลังจากการต้มเยื่อ โดยใช้มาตรฐานของ SCAN standard N33:94 [27] ในการวิเคราะห์และทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งของแต่ละภาวะ

3.2.1.4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (fiber morphology) เป็นการวัดค่าความยาวของเส้นใย ตามมาตรฐาน ISO 16065-1:2001 [28] ความกว้างของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (kink index) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ดังแสดงในภาพที่ 3-4 โดยจะทำการวัดเส้นใยแต่ละครั้งเป็นจำนวน 5000 เส้น และทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ

**ภาพที่** 3-4 เครื่องวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (FQA)

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

3.2.1.5 การขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ (handsheet)

นำเยื่อที่ได้มาตีกระจายในเครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator) ก่อนนำเยื่อมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบแบบ Rapid-Kothen (Rapid-Kothen sheet former) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 ตามมาตรฐานการขึ้นแผ่นทดสอบ ISO 5269-2 [29] โดยที่

ตัวเครื่องของขึ้นแผ่นทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet forming) และส่วนอบแห้ง (dryer) โดยมีขั้นตอนการขึ้นแผ่นทดสอบดังนี้

**ภาพที่** 3-5 เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ

3.2.1.5.1 ปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อจากร้อยละ 1.56 ให้เป็นความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น

3.2.1.5.2 คำนวณปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องใช้ในการขึ้นแผ่นให้ได้แผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร

3.2.1.5.3 เทน้ำเยื่อที่คำนวณได้ลงในส่วนขึ้นแผ่นทดสอบ แล้วทำการระบายน้ำ (drainage) ออก ซึ่งจะส่งผลให้เส้นใยเกิดการสานตัวกันกลายเป็นแผ่นทดสอบ โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกระดาษวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร

3.2.1.5.4 นำแผ่นทดสอบที่ขึ้นแผ่นเรียบร้อยแล้วมาปิดประกบด้วยกระดาษที่ใช้ขึ้นแผ่นแล้วนำมาอบแห้งในส่วนอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 นาที

3.2.1.6 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบแต่ละภาวะมาปรับสภาพในห้องควบคุมภาวะ จากนั้นเริ่มทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบดังต่อไปนี้

3.2.6.1 หนักมาตรฐาน (basis weight) คือ น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนมากมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรืออาจเรียกว่าแกรม ทำการวัดโดยนำแผ่นทดสอบมาชั่งน้ำหนักแล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารพื้นที่ของแผ่นทดสอบ

3.2.6.2 ความหนา (thickness) คือระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบภายใต้ภาวะที่กำหนด โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนา หน่วยที่วัดได้เป็นมิลลิเมตร

3.2.6.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) เป็นค่าที่คำนวณได้จากนำน้ำหนักมาตรฐานหารด้วยความหนาของแผ่นทดสอบ

3.2.6.4 ความขาวสว่าง (brightness) เป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ 457 นาโนเมตร ของแผ่นทดสอบ ซึ่งการสะท้อนแสงนี้จะอยู่ในช่วงของการสะท้อนแสงสีน้ำเงิน ทำการวัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง ดังแสดงในภาพที่ 3-6 ตามมาตรฐาน TAPPI T 525 om-02 [30]

3.2.6.5 ความทึบแสง (opacity) เป็นการวัดความต้านทานในการให้แสงทะลุผ่านของแผ่นทดสอบ แผ่นทดสอบที่มีความทึบแสงสูงจะมีการทะลุผ่านของแสงน้อย การวัดความทึบแสงสามารถทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงเครื่องเดียวกับการวัดหาค่าความขาวสว่าง โดยทำการวัดตามมาตรฐาน TAPPI T 519 om-02 [31]

**ภาพที่ 3-6** เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ (Color Touch PC)

3.2.6.6 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) คือ ค่าแรงสูงสุดที่แผ่นทดสอบจะทนได้ก่อนที่แผ่นทดสอบจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ตามมาตรฐานของ TAPPI T 494 om-01 [32] จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

**ภาพที่ 3-7** เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง

3.2.6.7 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance) เป็นความสามารถของแผ่นทดสอบที่จะต้านแรงที่ใช้ในการฉีกแผ่นทดสอบต่อจากแนวตัดเริ่มต้น หน่วยที่วัดได้เป็นมิลลินิวตัน (mN) วัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก ดังแสดงในภาพที่ 3-8 โดยใช้วิธีแบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [33] จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

**ภาพที่** 3-8 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก

3.2.2 **การทดลองตอนที่** 2: **ศึกษาผลของการฟอกเยื่อกระดาษจากลำต้นข้าวโพดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์**

3.2.2.1 การเตรียมเยื่อจากลำต้นข้าวโพด

ผลิตเยื่อโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1

3.2.2.2 การฟอกเยื่อ

3.2.2.2.1 แบ่งเยื่อที่เตรียมไว้ออกเป็น 3 ส่วน เพื่อฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่ pH 10.5 อุณหภูมิ 75±2 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการฟอกเยื่อ 90 นาที

3.2.2.2.2 เตรียมเยื่อที่จะใช้ในการฟอกให้มีความเข้มข้นของเยื่อ (Consistency) ที่ร้อยละ 15 จากนั้นปรับ pH ของเยื่อด้วยโซเดียมซิลิเกตให้ได้ค่า pH 10.5±0.2 แล้วจึงเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่กำหนดไว้ในข้อ 3.2.2.2.1

3.2.2.2.3 นำเยื่อที่พร้อมทำการฟอกมาใส่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แล้วทำการฟอกตามเวลาที่กำหนด โดยทุก 20 นาที จะทำการบีบนวดเยื่อต่อเนื่องนาน 5 นาที เพื่อให้ประสิทธิภาพในการฟอกเยื่อดีขึ้น

3.2.2.2.4 เมื่อฟอกเยื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเยื่อไปล้างน้ำให้สะอาด แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไว้ทดสอบค่าคัปปานัมเบอร์ ตามข้อ 3.2.1.4.1 และลักษณะสัณฐาน

วิทยาของเส้นใย ตามข้อ 3.2.1.4.3 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือไปขึ้นแผ่นทดสอบและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง ความขาวสว่าง ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานแรงฉีก ตามข้อ 3.2.6.2 ถึงข้อ 3.2.6.7

3.2.2.4 ทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของการฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

### 3.2.3 การทดลองที่ 3: ศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากลำต้นข้าวโพด

#### 3.2.3.1 การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.2.3.1.1 ผลิตเอนไซม์ไซแลนเนสจากเชื้อราชนิด *Aureobasidium pullulans* โดยใช้วิธีของสีหนาท ประสงค์สุข และคณะ [34] เริ่มจากเตรียมเซลล์เริ่มต้นของ *A. pullulans* โดยเขี่ย *A. pullulans* 1 โคโลนีลงในอาหารสูตร basal medium ที่เติม 1 เปอร์เซ็นต์ (w/v) น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ปริมาตร 10 มิลลิลิตรในขวดชมพู่ (flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ทำการนับเซลล์โดยใช้เครื่อง haemacytometer จากนั้นเติมเซลล์เริ่มต้น ($2.5 \times 10^7$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในอาหารสูตร xylanase production medium (XPM) ที่เติม 1 เปอร์เซ็นต์ (w/v) น้ำตาลไซแลนเป็นแหล่งคาร์บอน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในขวดชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำอาหารเลี้ยงเชื้อที่ได้มาแยกเซลล์ *A. pullulans* ออก โดยการปั่นหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำส่วนน้ำใสไปวัดแอคติวิตีของเอนไซม์ (enzyme activity) ด้วยวิธี Somogyi-Nelson [35]

3.2.3.1.2 ฟอกเยื่อที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเป็นเยื่อข้าวโพดที่ผลิตโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม โดยใช้ไซแลนเนสร้อยละ 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเยื่อแห้งที่ pH ประมาณ 5.5±0.2 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.3.1.2.1 เตรียมเยื่อที่จะใช้ในการฟอกให้มีความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 15 จากนั้นปรับ pH ของเยื่อด้วยกรดซัลฟิวริก ($H_2SO_4$) ให้ได้ pH 5.5±0.2 แล้วทำการเติมเอนไซม์ไซแลนเนส ตามที่กำหนดไว้ในข้อ 3.2.3.1.2

3.2.3.1.2.2 นำเยื่อที่พร้อมทำการฟอกมาใส่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และฟอกตามเวลาที่กำหนด โดยทุก 20 นาที จะทำการบีบนวดเยื่อต่อเนื่องนาน 5 นาที เพื่อให้ประสิทธิภาพในการฟอกเยื่อดีขึ้น

3.2.3.1.2.3 เมื่อฟอกเยื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเยื่อไปล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน แบ่งเยื่อส่วนแรกส่วนหนึ่งไว้ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ตามข้อ 3.2.1.4.3 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือไปขึ้นแผ่นทดสอบและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง ความขาวสว่าง ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานแรงฉีก ตามข้อ 3.2.6.2 ถึงข้อ 3.2.6.7 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่สองมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.2.3.1.3 นำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสแล้วมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองตอนที่ 2 จากนั้นนำเยื่อไปล้างน้ำให้สะอาด แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไว้ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ตามข้อ 3.2.1.4.3 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือไปขึ้นแผ่นทดสอบและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง ความขาวสว่าง ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานแรงฉีก ตามข้อ 3.2.6.2 ถึงข้อ 3.2.6.7

3.2.3.1.4 ทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

### 3.2.3.2 การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.2.3.2.1 ผลิตแลกเคสจาก *Pycnoporus coccineus* โดยนำเชื้อรา *Pynoporus coccineus* มาเลี้ยงบนอาหารสูตร PDA เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นเจาะชิ้นวุ้นที่มีเส้นใยเจริญอยู่ตรงส่วนปลายของเส้นใยด้วยที่เจาะจุกก๊อก (cork borer) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร นำชิ้นวุ้นที่เจาะมา 10 ชิ้น ถ่ายเส้นใยเชื้อราลงในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มี

อาหารสูตร production 100 มิลลิลิตร หลังจากเลี้ยงเชื้อราเป็นเวลา 2 วัน เติมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนขนาด 0.45 ไมโครเมตร เมื่อครบ 8 วัน นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกเส้นใยออกและนำส่วนน้ำใสมาหาแอคติวิตีของเอนไซม์ (enzyme activity) ด้วยวิธี laccase assay [36]

3.2.3.2.2 ฟอกเยื่อที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเป็นเยื่อข้าวโพดที่ผลิตโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม โดยใช้แลกเคสที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่ pH 5.5±0.2 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.3.2.2.1 เตรียมเยื่อที่จะใช้ในการฟอกให้มีความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 15 จากนั้นปรับ pH ของเยื่อด้วยกรดซัลฟิวริก ($H_2SO_4$) ให้ได้ pH 5.5±0.2 แล้วทำการเติมเอนไซม์แลกเคส ตามที่กำหนดไว้ในข้อ 3.2.3.2.2

3.2.3.2.2.2 นำเยื่อที่พร้อมทำการฟอกมาใส่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และฟอกตามเวลาที่กำหนด โดยทุก 20 นาที จะทำการบีบนวดเยื่อต่อเนื่องนาน 5 นาที เพื่อให้ประสิทธิภาพในการฟอกเยื่อดีขึ้น

3.2.3.2.2.3 เมื่อฟอกเยื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเยื่อไปล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไว้ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ตามข้อ 3.2.1.4.3 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือไปขึ้นแผ่นทดสอบและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง ความขาวสว่าง ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานแรงฉีก ตามข้อ 3.2.6.2 ถึงข้อ 3.2.6.7 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่สองมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.2.3.2.3 นำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสแล้วมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองตอนที่ 2 จากนั้นนำเยื่อไปล้างน้ำให้สะอาด แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไว้ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ตามข้อ 3.2.1.4.4 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือไปขึ้นแผ่นทดสอบและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง ความขาวสว่าง ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานแรงฉีก ตามข้อ 3.2.6.2 ถึงข้อ 3.2.6.7

3.2.3.2.4 ทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาภาวะเหมาะสมของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

**3.2.3.3. การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์**

3.2.3.3.1 การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนส เอนไซม์แลกเคส และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

3.2.3.3.1.1 ฟอกเยื่อที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเป็นเยื่อข้าวโพดที่ผลิตโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม โดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากข้อ 3.2.3.1 ตามด้วยเอนไซม์แลกเคสในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากข้อ 3.2.3.2 โดยสำหรับแต่ละเอนไซม์ทำการฟอกเยื่อที่ความเข้มข้นเยื่อร้อยละ 15 ที่ pH 5.5±0.2 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เมื่อฟอกเยื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเยื่อไปล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไว้ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ตามข้อ 3.2.1.4.3 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือไปขึ้นแผ่นทดสอบและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง ความขาวสว่าง ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานแรงฉีก ตามข้อ 3.2.6.2 ถึงข้อ 3.2.6.7

3.2.3.3.1.2 นำเยื่อส่วนที่สองมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองตอนที่ 2 จากนั้นนำเยื่อไปล้างน้ำให้สะอาด แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไว้ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ตามข้อ 3.2.1.4.3 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือไปขึ้นแผ่นทดสอบและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง ความขาวสว่าง ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานแรงฉีก ตามข้อ 3.2.6.2 ถึงข้อ 3.2.6.7

3.2.3.3.2 การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคส เอนไซม์ไซแลนเนส และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองเหมือนข้อ 3.2.3.3.1 ทุกประการ หากแต่เพียงใช้เอนไซม์แลกเคสก่อน แล้วค่อยตามด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส

3.2.3.3.3 การฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองเหมือนข้อ 3.2.3.3.1 ทุกประการ

หากแต่เพียงใช้เอนไซม์แลกเคสพร้อมกันกับเอนไซม์ไซแลนเนส โดยใส่เอนไซม์ทั้งสองพร้อมกัน และใช้เวลาฟอกเยื่อในขั้นตอนการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์รวม 60 นาที

3.2.3.3.4 ทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ นำค่าสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าการการใช้เอนไซม์ในการฟอกเยื่อ มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบเหล่านั้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

# บทที่ 4

# ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

## 4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีโซดา

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

ตารางที่ 4-1 แสดงผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาจากต้นข้าวโพดที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ผลผลิตเยื่อมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 มีค่าผลผลิตเยื่อสูงสุดและเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 25 ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อนั้น จะไปทำปฏิกิริยากับลิกนินและคาร์บอไฮเดรตที่อยู่ในชิ้นไม้ด้วย ดังนั้นปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไป อาจส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถูกทำลายมากขึ้น [11] จึงทำให้ผลผลิตเยื่อมีค่าลดลง ในขณะที่ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อนั้นมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ปริมาณด่างเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้เกิดการแทรกซึมของสารเคมีและเข้าทำปฏิกริยาในชิ้นไม้สูงขึ้น ลิกนินถูกขจัดออกได้มากขึ้น ชิ้นไม้แยกตัวกลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น ปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อจึงมีแนวโน้มลดลง จากการวิเคราะห์ด้วยสถิติ ดังแสดงผลในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อผลผลิตเยื่อและส่วนที่ไม่เป็นเยื่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.014 และ 0.003 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

**ตารางที่ 4-1** สมบัติของเยื่อข้าวโพดที่ผลิตด้วยวิธีโซดา

| ปริมาณ NaOH (%) | ผลผลิตเยื่อ (% ± SD) | ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (% ± SD) |
|---|---|---|
| 15 | 43.72 ± 1.00 | 5.37 ± 0.35 |
| 20 | 50.10 ± 0.74 | 2.51 ± 0.08 |
| 25 | 49.41 ± 0.56 | 2.36 ± 0.35 |

**4.1.2 สภาพระบายน้ำของเยื่อ (freeness) ก่อนบดเยื่อและปริมาณด่างที่เหลือหลังการต้มเยื่อ (residual alkali)**

สภาพระบายน้ำของเยื่อเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของเยื่อในการระบายน้ำ (drainage) ผ่านรูตะแกรง จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-2 พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น อาจส่งผลให้เส้นใยเกิดการแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดเส้นใยขนาดเล็ก (fines) เพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้เส้นใยในระบบมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมาก การอุ้มน้ำของเยื่อจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อลดลง และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อค่าสภาพระบายน้ำของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

**ตารางที่ 4-2** สภาพระบายน้ำของเยื่อก่อนบดเยื่อและปริมาณด่างที่เหลือหลังการต้มเยื่อด้วยวิธีโซดา

| ปริมาณ NaOH (%) | สภาพระบายน้ำของเยื่อก่อนบดเยื่อ (มิลลิลิตร ± SD) | ปริมาณด่างหลงเหลือหลังจากต้มเยื่อ (กรัม/ลิตร ± SD) |
|---|---|---|
| 15 | 644 ± 22 | 0 |
| 20 | 591 ± 15 | 7.37 ± 0.67 |
| 25 | 582 ± 14 | 13.79 ± 1.65 |

ปริมาณด่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4-2) โดยเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง พบว่าไม่มีปริมาณด่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ แสดงว่ามีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจนหมดและปริมาณที่ใช้อาจยังไม่เพียงพอ โดยสังเกตเห็นได้จากมีปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อสูง (ตารางที่ 4-1) ปริมาณด่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อมีความสำคัญ เนื่องจากถ้ามีปริมาณด่างไม่เพียงพอในระหว่างการต้มเยื่อ จะส่งผลให้ลิกนินที่ถูกละลายไปกลับมารวมตัวกันได้อีก เรียกว่าการเกิด lignin condensation ซึ่งทำให้การละลายลิกนินออกในขั้นตอนการฟอกเยื่อทำได้ยากและสิ้นเปลืองสารเคมีในการฟอกเยื่อเป็นอย่างมาก lignin condensation นี้จะเกิดเมื่อสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่า pH ต่ำกว่า 12 และจะเกิดอย่างต่อเนื่องและรุนแรงขึ้นเมื่อค่า pH เริ่มต่ำกว่า 6 ดังนั้นปริมาณด่างหลังการต้มเยื่อควรมีเหลือมากเกินพอที่จะป้องกันการเกิด lignin

condensation [11] เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณด่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.1.3 **ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย** (fiber characteristics)

ตารางที่ 4-3 แสดงผลของความยาวเส้นใยและลักษณะของเส้นใยหลังผ่านการบดเยื่อ เพื่อให้มีค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อใกล้เคียงกันก่อนทำการขึ้นแผ่นทดสอบ

**ตารางที่ 4-3** ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากเยื่อข้าวโพดที่ผลิตด้วยวิธีโซดา

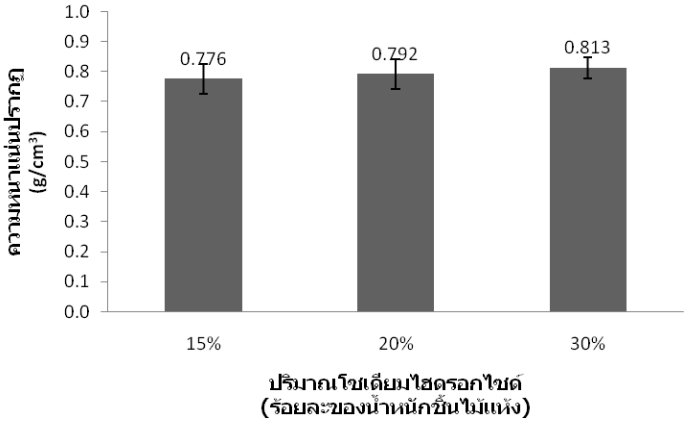
| | ปริมาณ NaOH (%) | | |
|---|---|---|---|
| | 15 | 20 | 25 |
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร) | 1.059 ± 0.059 | 1.132 ± 0.041 | 1.114 ± 0.069 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (เปอร์เซ็นต์) | 31.53 ± 1.939 | 34.04 ± 1.041 | 33.37 ± 3.322 |
| ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย | 0.097 ± 0.007 | 0.089 ± 0.003 | 0.084 ± 0.007 |
| ดัชนีความหักงอของเส้นใย | 1.626 ± 0.098 | 1.434 ± 0.104 | 1.341 ± 0.101 |
| ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร) | 18.28 ± 0.126 | 18.43 ± 0.096 | 18.50 ± 0.183 |

จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines content) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยให้ค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ในขณะที่ดัชนีความโค้งงอของเส้นใยและดัชนีความหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าลิกนินถูกขจัดออกมากขึ้น ทำให้ความไม่ชอบน้ำของเส้นใยลดน้อยลง ความแกร่งของเส้นใยลดลง เส้นใยรับน้ำได้มากขึ้น ความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยจึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งการที่ความโค้งงอของเส้นใยลดลง จึงส่งผลให้ความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น ในส่วนของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นเพราะการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปตัดโมเลกุลของน้ำตาลตรงปลายสายโซ่ของเซลลูโลสและเฮมมิเซลลูโลสทีละหนึ่งโมเลกุล ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า พิลลิ่ง (peeling reaction) จึงอาจส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นได้ ในส่วนของความกว้างของเส้นใยนั้นพบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อความกว้างของเส้นใยมากนัก

อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความโค้งงอของเส้นใยและดัชนีความหักงอของเส้นใยเท่านั้น ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.034 และ 0.003 ตามลำดับ และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.1.4 **ความหนาแน่นปรากฏ** (apparent density) **และความเรียบ** (smoothness)

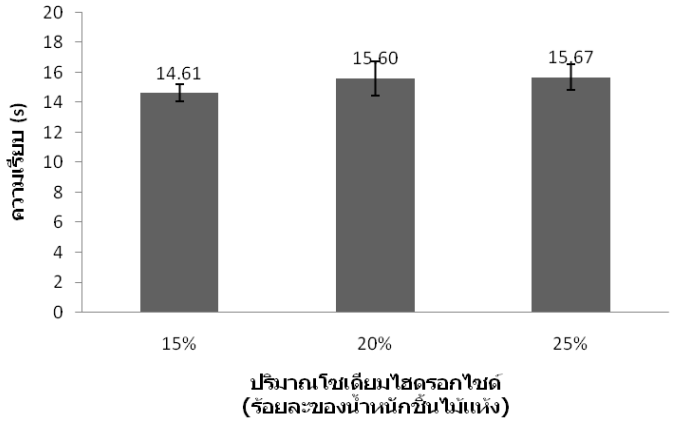
ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4-1 พบว่าการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย หากแต่เมื่อนำส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาพิจารณาด้วย จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นปรากฏที่ได้จากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ แทบจะไม่แตกต่างกัน เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4-4 จะเห็นได้ว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นปรากฏที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.209 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$




**ภาพที่ 4-1** ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

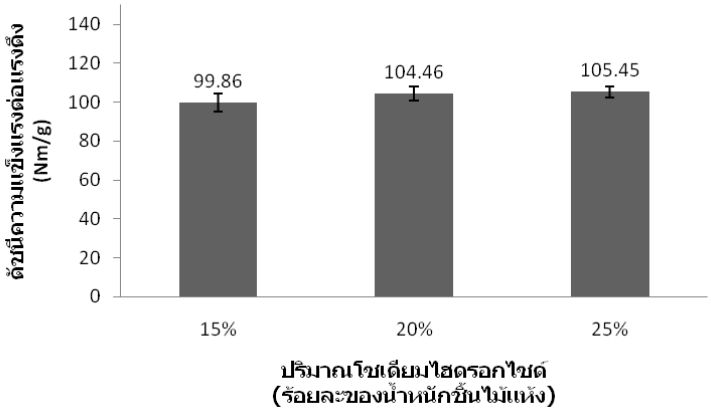
จากภาพที่ 4-2 ซึ่งแสดงผลของความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความเรียบของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กดังกล่าวจะไปช่วยอุดตามช่องว่างระหว่างเส้นใยตรงบริเวณผิวหน้าของแผ่นทดสอบ จึงอาจส่งผลให้ความเรียบของ

แผ่นทดสอบเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อความเรียบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.023 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$




**ภาพที่** 4-2 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

### 4.1.5 **ความแข็งแรงต่อแรงดึง** (tensile strength)

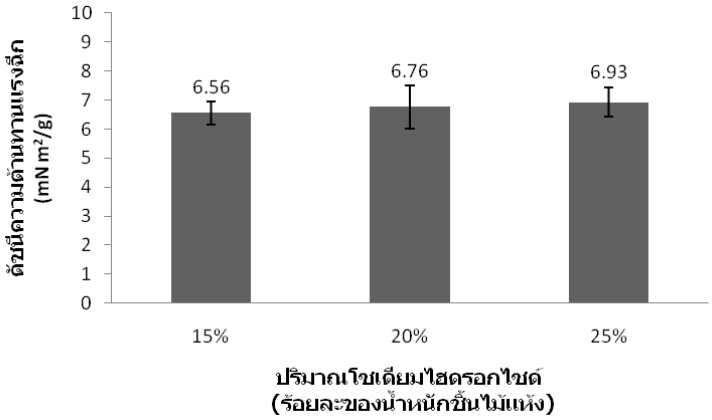



**ภาพที่** 4-3 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากภาพที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณ

โซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทำให้มีการละลายลิกนินออกจากเส้นใยมากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นและมีความอ่อนตัวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำมาขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ เส้นใยจึงมีการแนบชิดระหว่างกันและสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.006 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.1.6 **ดัชนีความต้านทานแรงฉีก** (tear resisance)

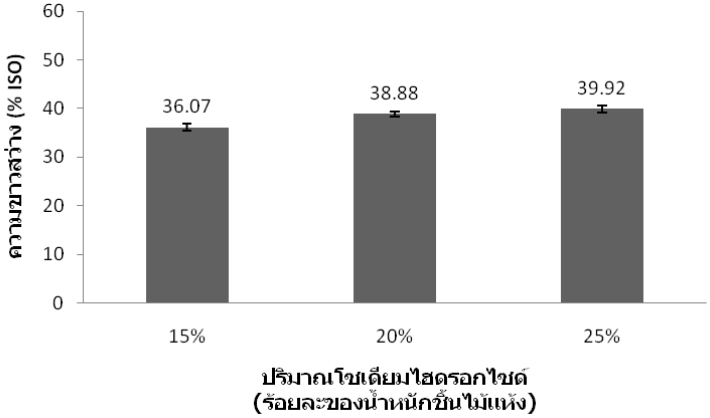



**ภาพที่ 4-4** ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากภาพที่ 4-4 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความยาวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น รวมถึงการที่เส้นใยมีการหักงอและความโค้งงอลดลง จึงอาจส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยดีขึ้น ซึ่งโดยปกติดัชนีความต้านทานแรงฉีกขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ มากกว่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย ดังนั้นเยื่อที่มีความยาวของเส้นใยสูงและเส้นใยมีความแข็งแรงมาก จะให้แผ่นทดสอบที่ทนต่อแรงฉีกสูง อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบ เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.357 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.1.7 **ความขาวสว่าง** (brightness)

จากภาพที่ 4-5 แสดงค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบ ซึ่งการวัดค่าความขาวสว่างนั้น เป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงในช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร



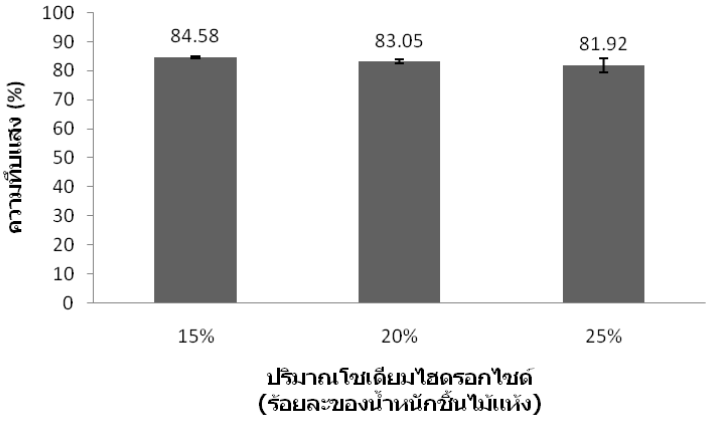

**ภาพที่** 4-5 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่าง
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากการทดลองพบว่าเมื่อการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษถูกกำจัดออกจากเยื่อได้มากขึ้น เมื่อผลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความขาวสว่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากมี P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.1.8 **ความทึบแสง** (opacity)

ภาพที่ 4-6 แสดงผลของการฟอกเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักแห้ง ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพด จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มลดลง การวัดค่าความทึบแสงของกระดาษเป็นการวัดความสามารถของกระดาษในการขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านของแสง การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้ลิกนินออกจากเยื่อมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เส้นใยสามารถแนบตัวกันได้ดีขึ้น จึงเกิดการกระเจิงแสงในแผ่นทดสอบ

น้อยลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสำหรับการหักเหของแสงน้อยลง แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จึงมีความทึบแสงลดลง




**ภาพที่** 4-6 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสงที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากมี P-value เท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-4 เพื่อศึกษาผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบจากต้นข้าวโพด พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ สภาพระบายน้ำของเยื่อ ปริมาณด่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ ความโค้งงอของเส้นใย ความหักงอของเส้นใย ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความขาวสว่าง และความทึบแสง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้ในภาพรวมเพื่อหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม พบว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เยื่อที่ผลิตได้ยังมีปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อสูงและแผ่นทดสอบมีค่าความแข็งแรงต่ำ ส่วนการต้มเยื่อที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เริ่มมีปริมาณด่างเหลือหลังจากการต้มเยื่อมากเกินไป ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมี ในขณะที่สมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบที่ได้ไม่แตกต่างจากเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20 เท่าไรนัก ดังนั้นจึงได้

เลือกปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อสำหรับการทดลองต่อไป ซึ่งเป็นการศึกษาการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

**ตารางที่ 4-4** ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ ต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อจากต้นข้าวโพด โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor

| สมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ | P-value | $F_{cal}$ | $F_{crit}$ |
|---|---|---|---|
| ผลผลิตเยื่อ | 0.014* | 23.840 | 9.552 |
| ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ | 0.003* | 68.621 | 9.552 |
| สภาพระบายน้ำของเยื่อ | 0.001* | 14.731 | 4.256 |
| ปริมาณด่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ | 0.000* | 180.735 | 4.256 |
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW | 0.145 | 2.409 | 4.256 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก | 0.328 | 1.264 | 4.256 |
| ความโค้งงอของเส้นใย | 0.034* | 5.010 | 4.256 |
| ความหักงอของเส้นใย | 0.003* | 12.533 | 4.256 |
| ความกว้างของเส้นใย | 0.121 | 2.700 | 4.256 |
| ความหนาแน่นปรากฏ | 0.209 | 1.659 | 3.354 |
| ความเรียบ | 0.023* | 4.376 | 3.354 |
| ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง | 0.006* | 6.160 | 3.354 |
| ดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีก | 0.357 | 1.072 | 3.354 |
| ความขาวสว่าง | 0.000* | 92.727 | 3.354 |
| ความทึบแสง | 0.001* | 8.405 | 3.354 |

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

## 4.2 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด

ผลการทดลองในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเยื่อที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก โดยทำการผลิตเยื่อที่จะใช้ในการทดลองฟอกเยื่อจากต้นข้าวโพดโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากับร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (ภาวะเหมาะสมที่ได้

จากข้อ 4.1) แล้วนำเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกมาขึ้นแผ่นทดสอบอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ผ่านการฟอก และทำการวิเคราะห์ถึงผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ได้จากเยื่อที่ผ่านการฟอกแล้ว

### 4.2.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ตารางที่ 4-5 แสดงผลของความยาวเส้นใยและลักษณะของเส้นใยที่ได้จากการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อไม่ฟอกแล้ว การฟอกเยื่อส่งผลให้ความยาวของเส้นใย ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย ดัชนีความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใยเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กกลับลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารฟอกเยื่อนั้น ไม่เพียงแต่เข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน แต่จะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยด้วย โดยเส้นใยขนาดเล็กซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าจะถูกทำปฏิกิริยาก่อน จึงอาจส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในระบบลดลง และด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยและความกว้างเฉลี่ยของเส้นใยในระบบเพิ่มขึ้น ในส่วนของดัชนีความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจากการฟอกเยื่อนั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากการนวดเยื่อ (pulp kneading) ในระหว่างการฟอกเยื่อ ซึ่งอาจทำให้เส้นใยเกิดการหักงอและโค้งงอมากขึ้น

**ตารางที่** 4-5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

| สัณฐานวิทยาของเส้นใย | เยื่อไม่ฟอก | ปริมาณ $H_2O_2$ (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 5 | 10 | 15 |
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร) | 1.132 ± 0.041 | 1.243 ± 0.106 | 1.206 ± 0.028 | 1.173 ± 0.007 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (เปอร์เซ็นต์) | 34.04 ± 1.041 | 27.85 ± 1.057 | 28.25 ± 1.035 | 28.18 ± 0.578 |
| ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย | 0.089 ± 0.003 | 0.109 ± 0.004 | 0.102 ± 0.006 | 0.105 ± 0.007 |
| ดัชนีความหักงอของเส้นใย | 1.434 ± 0.104 | 1.806 ± 0.049 | 1.669 ± 0.036 | 1.748 ± 0.112 |
| ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร) | 18.43 ± 0.096 | 19.25 ± 0.058 | 19.30 ± 0.082 | 19.25 ± 0.129 |

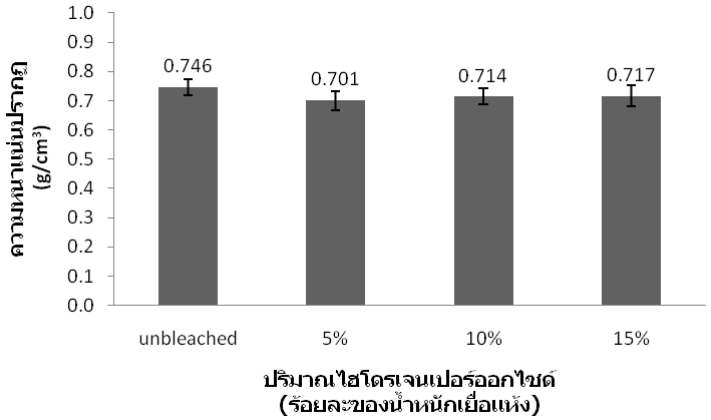
เมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มของเยื่อฟอกด้วยกันพบว่า เมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ความยาวเส้นใยและดัชนีความหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความ

โค้งงอของเส้นใยปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และความกว้างของเส้นใยไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำค่าส่วนเบี่ยนเบนมาตรฐาน (SD) มาพิจารณาด้วย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าลิกนินถูกขจัดออก จึงทำให้เส้นใยรับน้ำได้ดีขึ้นและมีความอ่อนตัวลง ความหักงอของเส้นใยจึงลดลง อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ความหักงอของเส้นใยที่ลดลงไม่ได้ส่งผลให้ความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อเพิ่มขึ้นและหากมีการควบคุมภาวะในการฟอกเยื่อไม่ดีพอ เช่น ที่ภาวะอุณหภูมิสูงเกินไปหรือเป็นด่างมากเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีโอกาสแตกตัวเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิเคิล (perhydroxial radical, OOH●) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงที่สามารถไปทำลายคาร์บอไฮเดรตของเส้นใยได้ จึงอาจส่งผลให้ความยาวเส้นใยลดลง

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-6 พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย เนื่องจากค่า P-value ของความยาวเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความโค้งงอของเส้นใย ความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย มีค่าเท่ากับ 0.359, 0.807, 0.235, 0.076 และ 0.698 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

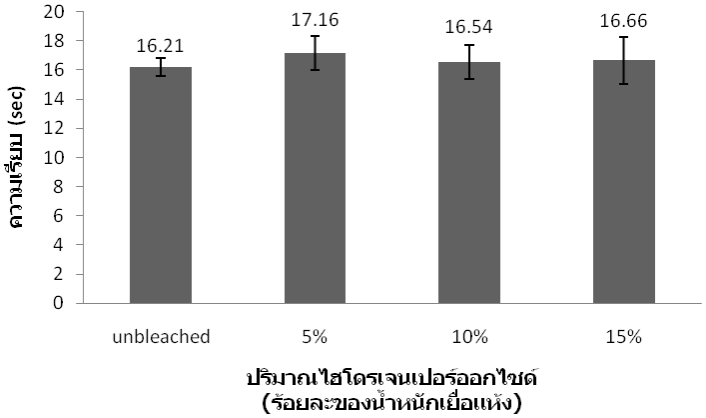
### 4.2.3 **ความหนาแน่นปรากฏและความเรียบ**

ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-7 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อไม่ฟอกแล้ว การฟอกเยื่อส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถูกทำลายไปด้วยในระหว่างการฟอกเยื่อ แม้การฟอกเยื่อจะส่งผลให้ลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยควรดีขึ้น แผ่นทดสอบควรมีความหนาแน่นมากขึ้น หากแต่ในกรณีนี้อาจเป็นไปได้ว่าคาร์บอไฮเดรตของเส้นใยถูกทำลายมากกว่า จึงส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเกิดขึ้นได้ไม่ดีนัก ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบจึงลดลง (ดังจะเห็นได้จากความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อฟอกมีค่าต่ำกว่าแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อไม่ฟอก ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป)




**ภาพที่** 4-7 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่น
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากการเปรียบเทียบเฉพาะในกลุ่มเยื่อที่ผ่านการฟอกพบว่า ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันดีขึ้น ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการที่แผ่นทดสอบมีความหนาแน่นมากขึ้น อาจส่งผลให้ความเรียบของแผ่นทดสอบลดน้อยลง ซึ่งจากผลการทดลองที่ปรากฏในภาพที่ 4-8 แสดงให้เห็นแนวโน้มดังกล่าว

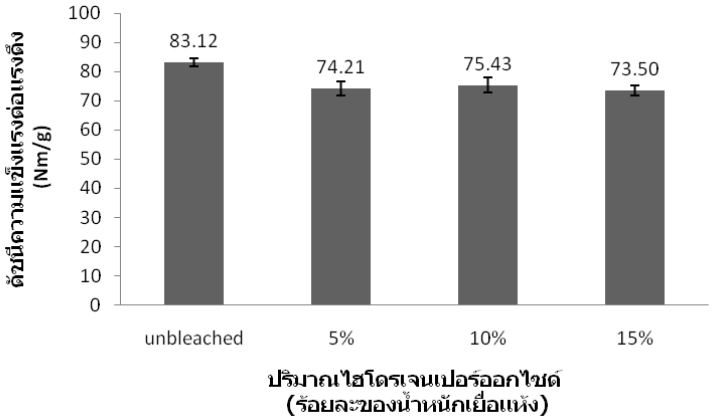



**ภาพที่** 4-8 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเรียบ
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในระดับต่างๆ ไม่มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏและความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value ของความหนาแน่นปรากฏและความเรียบมีค่าเท่ากับ 0.649 และ 0.710 ตามลำดับ และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.2.4 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากภาพที่ 4-9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกแล้ว การฟอกเยื่อส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงไปมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะส่วนเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ซึ่งเป็นคาร์บอไฮเดรตของเส้นใยถูกทำลาย ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยกันพบว่าการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบอย่างไม่ชัดเจนนัก แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงแรกดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกเพิ่มขึ้นอีก ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงกลับลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลิกนินในเยื่อถูกกำจัดออก ทำให้เส้นใยสร้างพันธะระหว่างกันดีขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไป อาจทำให้คาร์บอไฮเดรตของเส้นใยถูกทำลาย ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงลดลง

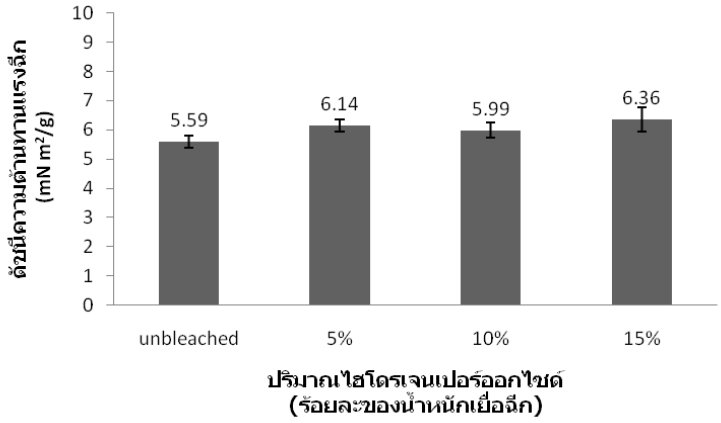



**ภาพที่** 4-9 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.154 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.2.5 ดัชนีความต้านทานแรงฉีก

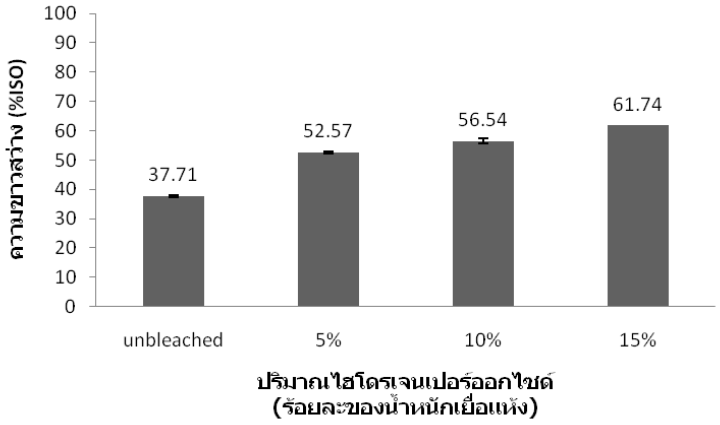
ภาพที่ 4-10 แสดงผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบ จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกแล้ว การฟอกเยื่อส่งผลให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยในส่วนที่เป็นเส้นใยขนาดเล็กก่อนเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก จึงส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง และความยาวเฉลี่ยของเส้นใยในระบบมากขึ้น (ตารางที่ 4-5) ซึ่งค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใย เมื่อในระบบมีเส้นใยยาวมาก ดัชนีความต้านทานแรงฉีกจึงมีค่ามากไปด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในกลุ่มของเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยกันพบว่า ผลของการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบมีทิศทางที่ไม่ชัดเจน และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.051 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$




**ภาพที่** 4-10 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

### 4.2.6 **ความขาวสว่าง**

จากภาพที่ 4-11 แสดงให้เห็นว่าการฟอกเยื่อและการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความขาวสว่างของแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบถูกกำจัดออกจากเยื่อมากขึ้น และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความขาวสว่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณสูงกว่าค่า $F_{crit}$

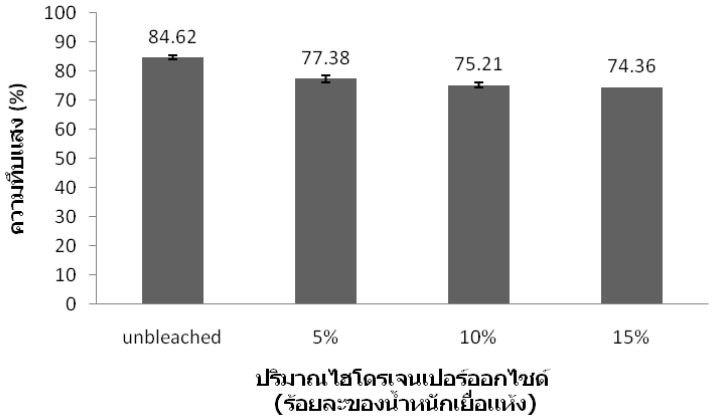



**ภาพที่ 4-11** ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

### 4.2.7 **ความทึบแสง**

ค่าความทึบแสงของกระดาษเป็นค่าความสามารถของกระดาษในการขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านของแสง การฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมถึงการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ ส่งผลให้ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบลดลง (ภาพที่ 4-12) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น ทำให้ลิกนินถูกกำจัดออกจากเยื่อมากขึ้น แผ่นทดสอบมีความขาวขึ้น ส่งผลให้การดูดกลืนแสงไว้ในชั้นของแผ่นทดสอบลดน้อยลง แสงจึงสามารถลอดผ่านแผ่นทดสอบมากขึ้น ความทึบแสงของแผ่นทดสอบจึงน้อยลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงไว้ตารางที่ 4-6 พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสงที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณสูงกว่าค่า $F_{crit}$




**ภาพที่** 4-12 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบจากต้นข้าวโพด พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความขาวสว่างและความทึบแสง โดยที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งให้ค่าความขาวสว่างสูงสุด ในขณะที่สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงได้เลือกปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเพื่อใช้ในการฟอกเยื่อร่วมกับเอนไซม์ต่อไป

**ตารางที่** 4-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระดับต่างๆ ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบ โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor

| สมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ | P-value | $F_{cal}$ | $F_{crit}$ |
|---|---|---|---|
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW | 0.359 | 1.151 | 4.256 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก | 0.807 | 0.220 | 4.256 |
| ความโค้งงอของเส้นใย | 0.235 | 1.705 | 4.256 |
| ความหักงอของเส้นใย | 0.076 | 3.486 | 4.256 |
| ความกว้างของเส้นใย | 0.698 | 0.375 | 4.256 |
| ความหนาแน่นปรากฏ | 0.649 | 0.441 | 3.443 |
| ความเรียบ | 0.710 | 0.348 | 3.443 |
| ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง | 0.154 | 2.042 | 3.443 |
| ดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีก | 0.051 | 3.410 | 3.443 |
| ความขาวสว่าง | 0.000* | 313.647 | 3.443 |
| ความทึบแสง | 0.000* | 13.287 | 3.443 |

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

## 4.3 ผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากต้นข้าวโพด

### 4.3.1 ผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากต้นข้าวโพด

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.1 นี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเยื่อที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก สำหรับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกนั้นจะเป็นเยื่อที่ผลิตได้จากการต้มชิ้นไม้ต้นข้าวโพดเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากับร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (ภาวะเหมาะสมที่หาได้จากข้อ 4.1 สำหรับเยื่อที่ผ่านการฟอกนั้นประกอบด้วยการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเพียงอย่างเดียว และการฟอกเยื่อโดยการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณต่างๆ กัน โดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร้อยละ 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แล้วจึงนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แล้วมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ภาวะเหมาะสมที่หาได้จากข้อ 4.2)

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ถึงผลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ได้จากเยื่อที่ผ่านการฟอกแล้ว

#### 4.3.1.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

จากตารางที่ 4-7 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอกโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวแล้ว พบว่าการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสก่อนที่จะนำไปฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้เยื่อมีความยาวของเส้นใยและความกว้างของเส้นใยลดลง ในขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย และดัชนีความหักงอของเส้นใยกลับเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสส่งผลให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีขึ้น โดยไปทำปฏิกิริยากับไซแลน ส่งผลให้พันธะระหว่างลิกนินกับเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลนถูกทำลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้น เส้นใยจึงมีขนาดสั้นลง ความกว้างลดลง และมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น ในส่วนของดัชนีความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากการนวดเยื่อในระหว่างการฟอกเยื่อ ซึ่งอาจทำให้เส้นใยเกิดการหักงอและโค้งงอมากขึ้น

**ตารางที่** 4-7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

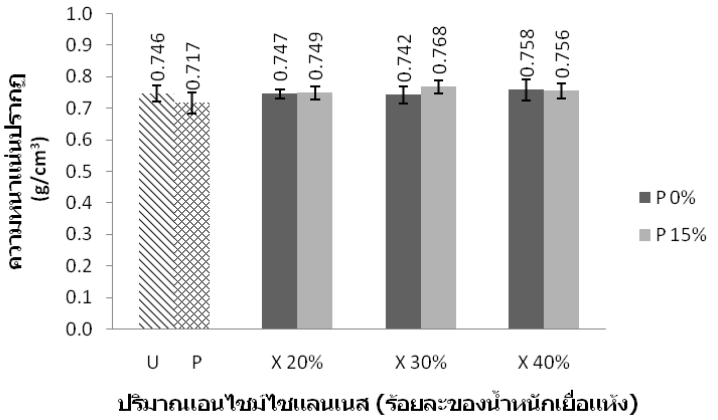
| สัณฐานวิทยาของเส้นใย | เยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก | เยื่อที่ฟอกด้วย $H_2O_2$ เพียงอย่างเดียว | ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนส (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 20 | 30 | 40 |
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร) | 1.132 ±0.041 | 1.173 ±0.007 | 1.082 ±0.035 | 1.068 ±0.050 | 1.081 ±0.039 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (เปอร์เซต์) | 34.04 ±1.041 | 28.18 ±0.578 | 37.02 ±1.885 | 38.80 ±3.054 | 38.38 ±1.298 |
| ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย | 0.089 ±0.003 | 0.105 ±0.007 | 0.131 ±0.013 | 0.140 ±0.015 | 0.130 ±0.013 |
| ดัชนีความหักงอของเส้นใย | 1.434 ±0.104 | 1.748 ±0.112 | 2.215 ±0.090 | 2.337 ±0.234 | 2.203 ±0.180 |
| ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร) | 18.43 ±0.096 | 19.25 ±0.129 | 17.90 ±0.200 | 18.10 ±0.283 | 18.05 ±0.100 |

เมื่อพิจารณาการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่างๆ พบว่าปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้มีผลต่อความยาวของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย ดัชนีความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใยในทิศทางที่ไม่ชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วมด้วยกลับพบว่าค่าที่ได้แทบไม่มีความแตกต่างกัน และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-8 พบว่าปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย เนื่องจากค่า P-value ของความยาวของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความโค้งงอของเส้นใย ความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย มีค่าเท่ากับ 0.870, 0.515, 0.571, 0.521 และ 0.405 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ากว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.1.2 **ความหนาแน่นปรากฏและความเรียบ**

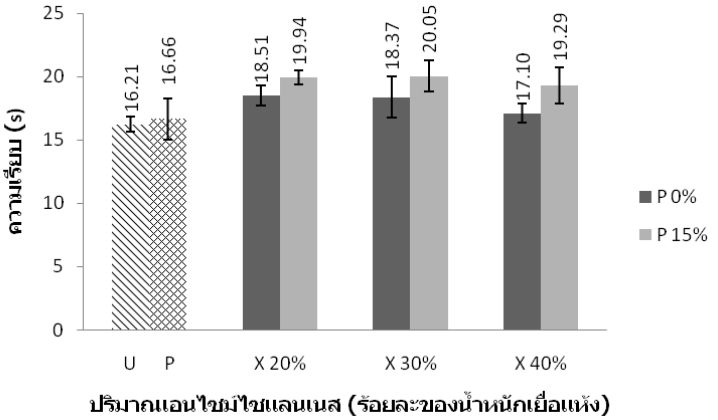
จากภาพที่ 4-13 แสดงความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวพบว่า การปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นจากการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว และมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีแนวโน้มเท่ากับเยื่อไม่ฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ส่งผลให้ความกว้างของเส้นใยลดลง (ตารางที่ 4-7) เส้นใยอ่อนตัวลง การแนบตัวกันของเส้นใยดีขึ้น ความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ พบว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบน้อยมาก เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบใกล้เคียงกัน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-8 พบว่าปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้ในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.154 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, X = Xylanase

**ภาพที่** 4-13 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, X = Xylanase

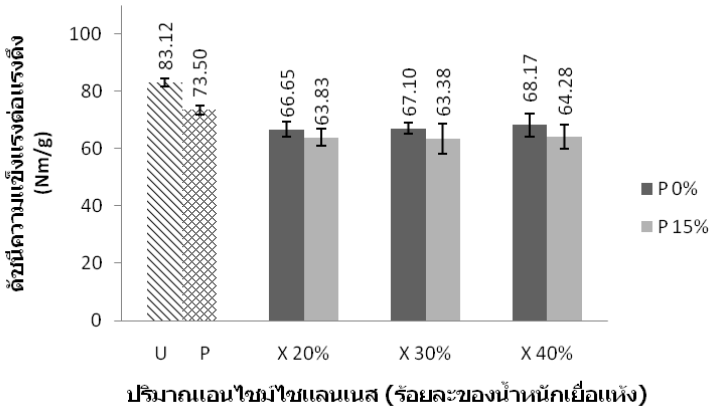
**ภาพที่** 4-14 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากภาพที่ 4-14 แสดงความเรียบของแผ่นทดสอบที่เมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ทำให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้มีความเรียบมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดสั้นลงและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้ว

เส้นใยสั้นจะให้กระดาษที่มีความเรียบมากกว่าเส้นใยยาว รวมถึงเส้นใยขนาดเล็ก หากมีมากจะทำให้กระดาษมีความเรียบสูง เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้จะไปอุดตามรูพรุนที่อยู่ระหว่างเส้นใยนั่นเอง การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ความเรียบของแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-8 พบว่าปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความเรียบ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.285 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.1.3 **ความแข็งแรงต่อแรงดึง**

ภาพที่ 4-15 แสดงความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, X = Xylanase

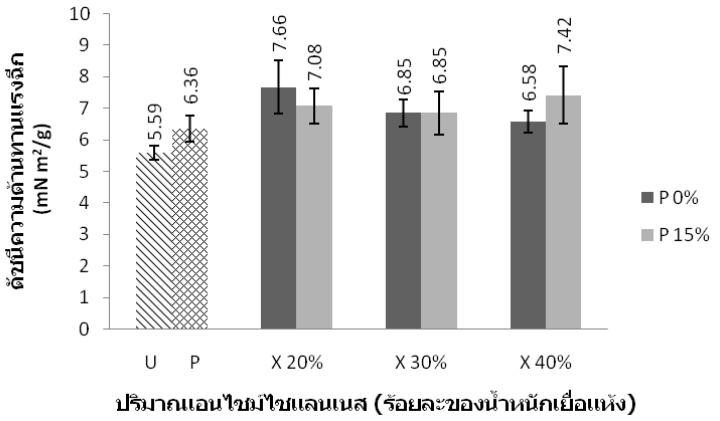
**ภาพที่** 4-15 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง และความแข็งแรงดังกล่าวยิ่งลดลงเมื่อนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสไปทำการฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความแข็งแรงต่อแรงดึงขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใย เส้นใยที่มีการสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีจะส่งผลให้แผ่นทดสอบมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง เอนไซม์ไซแลนเนสจะไปตัดสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลน (น้ำตาลไซโลส) ที่ตำแหน่ง 1, 4-β-D-xylosidic linkages เป็นการเปิด

ผิวของเส้นใยทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยได้มากขึ้น จึงอาจทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดน้อยลง เส้นใยรับน้ำได้น้อยลง การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้อยลง ทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบลดลง

เมื่อพิจารณาถึงผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณต่างๆ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแล้วนำเยื่อไปฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไม่ได้ทำให้ดัชนีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบแตกต่างกันมากนัก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-8 พบว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็งแรงต่อแรงดึง เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.895 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.1.4 **ดัชนีความต้านทานแรงฉีก**




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, X = Xylanase

**ภาพที่** 4-16 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากภาพที่ 4-16 แสดงดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในการฟอกเยื่อแล้วตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกหรือฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยทั่วไปแล้วความแข็งแรงของเส้นใยมีบทบาทต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกมากกว่าพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งข้อมูลจากตารางที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสก่อนการฟอกเยื่อ

ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้เส้นใยมีความยาวลดลง รวมถึงปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกนี้อาจเนื่องมาจากการที่ค่าความโค้งงอและการหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น [37] จึงอาจส่งผลให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นได้

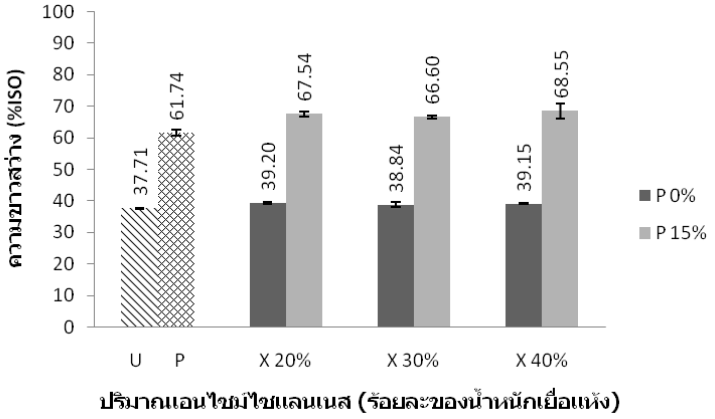
เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในระดับต่างๆ ก่อนการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกพบว่า ให้ผลในทิศทางที่ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ดี เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกค่อนข้างสอดคล้องกับค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใย กล่าวคือ หากค่าค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยของเส้นใยสูง ดัชนีความต้านทานแรงฉีกก็จะสูงไปด้วย [37] (ตารางที่ 4-7 และภาพที่ 4-16) เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-8 พบว่า การใช้ปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสต่างๆ กันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.237 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.1.5 **ความขาวสว่าง**

จากภาพที่ 4-17 แสดงค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่างๆ ก่อนที่จะนำมาฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์อย่างเดียวส่งผลให้ความขาวสว่างเพิ่มขึ้นจากเยื่อที่ยังไม่ฟอกไม่สูงมากนัก แต่เมื่อนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์มาทำการฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เยื่อที่ได้จะมีค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก เยื่อที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสเพียงอย่างเดียว และเยื่อที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเอนไซม์ไซแลนเนสเข้าไปช่วยเปิดผิวของเส้นใย โดยทำปฏิกิริยากับไซแลนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเฮมิเซลลูโลส และยังช่วยตัดสายโซ่ของสารประกอบคาร์บอไฮเดรตกับลิกนินที่เรียกว่า lignin-carbohydrate complex ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้สะดวกยิ่งขึ้น ลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษจึงถูกกำจัดออกมากขึ้น ทำให้ความขาวสว่างของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในระดับที่เพิ่มขึ้นร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-8 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไซแลน

เนสที่ใช้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความขาวสว่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีมีค่า P-value เท่ากับ 0.027 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$



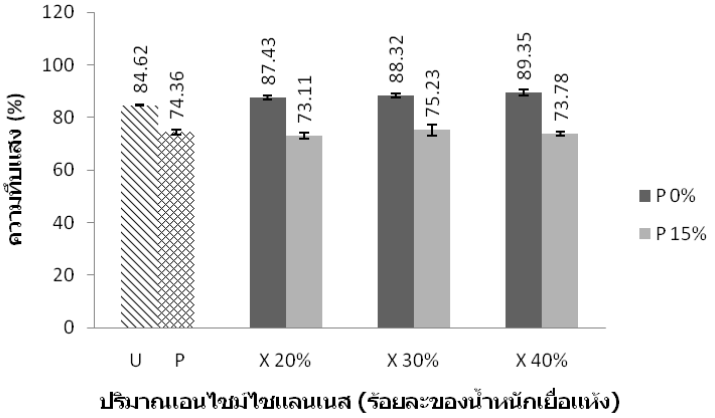

**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, X = Xylanase

**ภาพที่** 4-17 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

#### 4.3.1.6 **ความทึบแสง**

จากภาพที่ 4-18 แสดงค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสที่ระดับต่างๆ ก่อนที่จะฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่า ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ได้มีค่าต่ำกว่าแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก และมีค่าใกล้เคียงกับเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อมีผลต่อความทึบแสงมากกว่าปริมาณไซแลนเนสที่ใช้ โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสเพียงอย่างเดียว ค่าความทึบแสงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่าเยื่อที่ไม่ฟอกเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลจากสีของเอนไซม์ที่ทำให้เยื่อมีสีหม่นลง ความทึบแสงของกระดาษจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แล้วมาทำการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อพบว่า ค่าความทึบแสงลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว แม้นการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ก่อนจะส่งผลให้เส้นใยมีความยาวลดลงและปริมาณเส้นใยขนาดเล็ดลดลงก็ตาม

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในระดับที่เพิ่มขึ้นร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ให้ค่าความทึบแสงหลังการฟอกเยื่อของแผ่นทดสอบไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-8 กลับพบว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีมีค่า P-value เท่ากับ 0.011 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, X = Xylanase

**ภาพที่** 4-18 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติจากตารางที่ 4-8 เพื่อศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบจากต้นข้าวโพด พบว่าปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่ใช้มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความขาวสว่างและความทึบแสงของแผ่นทดสอบเท่านั้น และเนื่องจากสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ได้จากการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสด้วยปริมาณต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก จึงเลือกใช้เอนไซม์ไซแลนเนสที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง สำหรับใช้ทำการทดลองในการทดลองต่อไป

**ตารางที่** 4-8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษและเส้นใยโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor

| สมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ | P-value | $F_{cal}$ | $F_{crit}$ |
|---|---|---|---|
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW | 0.870 | 0.142 | 4.256 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก | 0.515 | 0.715 | 4.526 |
| ความโค้งงอของเส้นใย | 0.571 | 0.596 | 4.256 |
| ความหักงอของเส้นใย | 0.521 | 0.702 | 4.256 |
| ความกว้างของเส้นใย | 0.405 | 1.000 | 4.256 |
| ความหนาแน่นปรากฏ | 0.154 | 2.004 | 3.354 |
| ความเรียบ | 0.285 | 1.317 | 3.354 |
| ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง | 0.895 | 0.112 | 3.354 |
| ดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีก | 0.237 | 1.519 | 3.354 |
| ความขาวสว่าง | 0.027* | 4.135 | 3.354 |
| ความทึบแสง | 0.011* | 5.413 | 3.354 |

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

### 4.3.2 ผลของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากต้นข้าวโพด

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2 นี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเยื่อที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก สำหรับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกนั้นจะเป็นเยื่อที่ผลิตได้จากการต้มชิ้นไม้ต้นข้าวโพดเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากับร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (ภาวะเหมาะสมที่หาได้จากข้อ 4.1) สำหรับเยื่อที่ผ่านการฟอกนั้นจะมีตั้งแต่การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเพียงอย่างเดียว และการฟอกเยื่อโดยการใช้เอนไซม์แลกเคสในปริมาณต่างๆ กันก่อน โดยใช้เอนไซม์แลกเคสร้อยละ 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แล้วจึงนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แล้วมาทำการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ภาวะเหมาะสมที่หาได้จากข้อ 4.2) นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ถึงผลของปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่ใช้ต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ได้จากเยื่อที่ผ่านการฟอกแล้ว

### 4.3.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

**ตารางที่** 4-9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ฟอกด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

| สัณฐานวิทยาของเส้นใย | เยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก | เยื่อที่ฟอกด้วย $H_2O_2$ เพียงอย่างเดียว | ปริมาณเอนไซม์แลกเคส (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 20 | 30 | 40 |
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร) | 1.132 ± 0.041 | 1.173 ± 0.007 | 1.080±0.071 | 1.030±0.083 | 1.071±0.051 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (เปอร์เซ็นต์) | 34.04 ± 1.041 | 28.18 ± 0.578 | 37.72±2.342 | 38.49±3.785 | 36.07±1.602 |
| ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย | 0.089 ± 0.003 | 0.105 ± 0.007 | 0.114±0.006 | 0.120±0.004 | 0.128±0.014 |
| ดัชนีความหักงอของเส้นใย | 1.434 ± 0.104 | 1.748 ± 0.112 | 2.012±0.059 | 2.073±0.047 | 2.183±0.141 |
| ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร) | 18.43 ± 0.096 | 19.25 ± 0.129 | 18.40±0.271 | 18.40±0.141 | 18.33±0.126 |

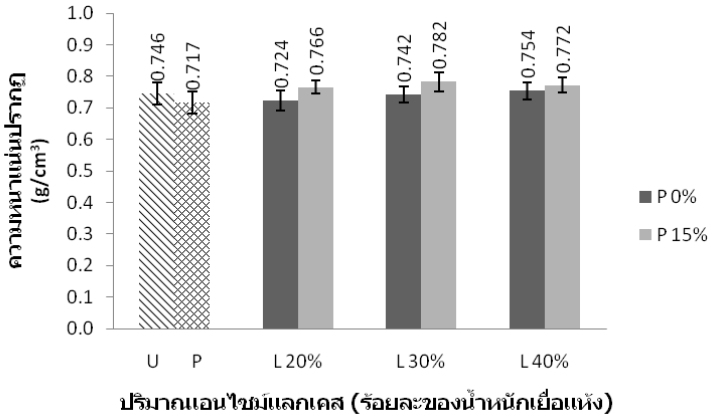
จากตารางที่ 4-9 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอกโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวแล้ว พบว่าการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสก่อนที่จะนำไปฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้เยื่อมีความยาวของเส้นใยและความกว้างของเส้นใยลดลง ในขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย และดัชนีความหักงอของเส้นใยกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นมีแนวโน้มเหมือนกับในกรณีของเอนไซม์ไซแลนเนส นั่นแสดงว่าการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสส่งผลให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีขึ้น โดยเอนไซม์แลกเคสไม่เพียงแต่ไปทำปฏิกิริยากับลิกนินเท่านั้น เอนไซม์แลกเคสซึ่งมีอาจเอนไซม์ไซแลนเนสปนอยู่ด้วยเล็กน้อยยังไปทำปฏิกิริยากับไซแลน ส่งผลให้พันธะระหว่างลิกนินกับเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลนถูกทำลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้น เส้นใยจึงมีขนาดสั้นลง ความกว้างลดลง และมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น ในส่วนของดัชนีความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากการนวดเยื่อในระหว่างการฟอกเยื่อ ซึ่งอาจทำให้เส้นใยเกิดการหักงอและโค้งงอมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสที่ระดับต่างๆ พบว่าปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่ใช้มีผลต่อความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในทิศทางที่ไม่ชัดเจน ในขณะที่ดัชนีความโค้งงอของเส้นใยและดัชนีความหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อใช้เอนไซม์แลกเคสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความกว้างของเส้นใยนั่นแทบไม่เปลี่ยนแปลง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-10 พบว่าปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่ใช้ในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย เนื่องจากค่า P-value ของความยาวของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความโค้งงอของเส้นใย ความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย มีค่าเท่ากับ 0.574, 0.472, 0.159, 0.076 และ 0.817 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.2.2 ความหนาแน่นปรากฏและความเรียบ

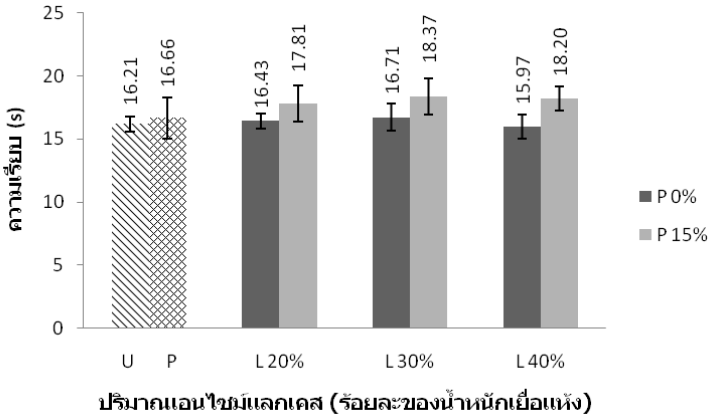
จากภาพที่ 4-19 แสดงความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวพบว่า การปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏที่ลดลงจากการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว มีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าความหนาแน่นปรากฏของเยื่อไม่ฟอกเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสนอกจากส่งผลให้ลิกนินมีปริมาณน้อยลง ยังทำให้ความกว้างของเส้นใยลดลง (ตารางที่ 4-9) เส้นใยอ่อนตัวลง การแนบกันระหว่างเส้นใยดีขึ้น ความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่ใช้พบว่า การใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบน้อยมาก เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบใกล้เคียงกัน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10 พบว่าปริมาณเอนไซม์ไซแลกเคสที่ใช้ในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.463 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, L = Laccase

**ภาพที่** 4-19 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, L = Laccase

**ภาพที่** 4-20 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

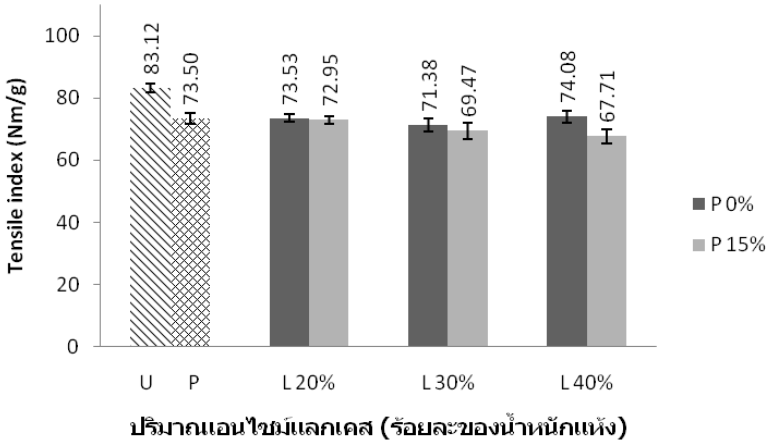
จากภาพที่ 4-20 แสดงความเรียบของแผ่นทดสอบที่เมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสทำให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้มีความเรียบมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับกรณีที่ใช้เอนไซม์ไซแลนเนส ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการปรับสภาพด้วย

เอนไซม์แลกเคส ซึ่งมีอาจมีเอนไซม์ไซแลนเนสปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดสั้นลง และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วเส้นใยสั้นจะให้กระดาษที่มีความเรียบมากกว่าเส้นใยยาว รวมถึงเส้นใยขนาดเล็กหากมีมากจะทำให้กระดาษมีความเรียบสูง เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้จะไปอุดตามรูพรุนที่อยู่ระหว่างเส้นใยนั่นเอง

การใช้เอนไซม์แลกเคสในปริมาณมากขึ้น ส่งผลต่อความเรียบอย่างไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตามความเรียบของแผ่นทดสอบมีความสอดคล้องกับปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในเยื่อ คือ เมื่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในเยื่อมากทำให้แผ่นทดสอบแผ่นทดสอบมีความเรียบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4-9) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-10 พบว่าปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความเรียบ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.676 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.2.3 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากภาพที่ 4-21 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง และความแข็งแรงดังกล่าวยิ่งลดลงเมื่อนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสไปทำการฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความแข็งแรงต่อแรงดึงขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใย เส้นใยที่มีการสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีจะส่งผลให้แผ่นทดสอบมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง เอนไซม์แลกเคสแม้นจะไปช่วยทำให้ลิกนินถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยน่าจะดีขึ้น หากแต่เอนไซม์แลกเคสนั้นมีเอนไซม์ไซแลนเนสปนอยู่ด้วย ซึ่งเอนไซม์ไซแลนเนสอาจจะไปตัดสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลน (น้ำตาลไซโลส) ที่ตำแหน่ง 1, 4-β-D-xylosidic linkages ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยได้มากขึ้น จึงอาจทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดน้อยลง เส้นใยรับน้ำได้น้อยลง การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้อยลง ทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบลดลง




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, L = Laccase

**ภาพที่** 4-21 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

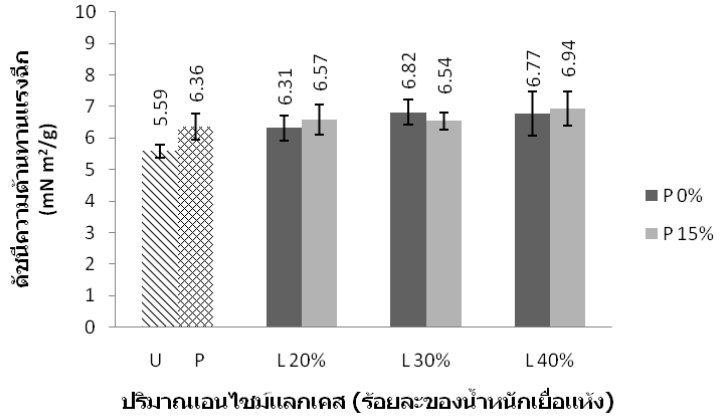
เมื่อพิจารณาถึงผลของการใช้เอนไซม์แลกเคสในปริมาณต่างๆ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า การใช้เอนไซม์แลกเคสในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแล้วนำเยื่อไปฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ดัชนีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-10 พบว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์แลกเคสส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็งแรงต่อแรงดึง เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณสูงกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.2.4 ความต้านทานต่อแรงฉีก

จากภาพที่ 4-22 แสดงดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์แลกเคสในการฟอกเยื่อแล้วตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกหรือฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยทั่วไปแล้วความแข็งแรงของเส้นใยมีบทบาทต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกมากกว่าพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งข้อมูลจากตารางที่ 4-9 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสก่อนการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้เส้นใยมีความยาวลดลง รวมถึงปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มของค่าดัชนีความต้านทาน

แรงฉีกนี้ อาจเนื่องมาจากการที่ค่าความโค้งงอและการหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น [37] จึงอาจส่งผลให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นได้

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลกเคสในระดับต่างๆ ก่อนการฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกพบว่า ให้ผลในทิศทางที่ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ดี เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกค่อนข้างสอดคล้องกับค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใย กล่าวคือ หากค่าค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยของเส้นใยสูง ดัชนีความต้านทานแรงฉีกก็จะสูงไปด้วย [37] (ตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-22) เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-10 พบว่า การใช้ปริมาณเอนไซม์แลกเคสต่างๆ กันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.179 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$



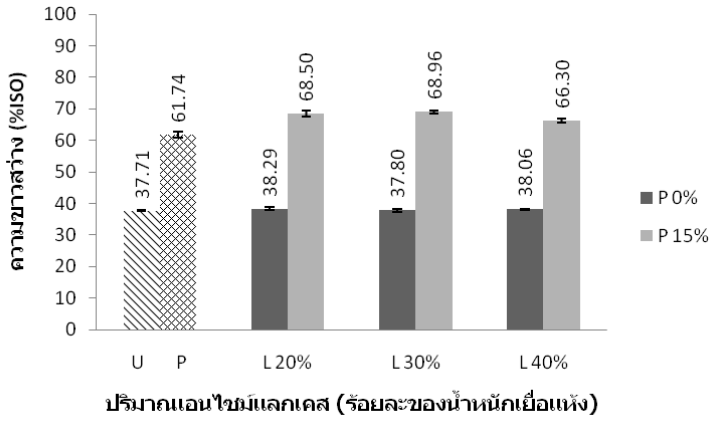

**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, L = Laccase

**ภาพที่** 4-22 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

#### 4.3.2.5 **ความขาวสว่าง**

จากภาพที่ 4-23 แสดงค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสที่ระดับต่างๆ ก่อนที่จะนำมาฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์อย่างเดียวให้ค่าความขาวสว่างไม่แตกต่างไปจากเยื่อที่ไม่ฟอกมากนัก แต่เมื่อนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์มาทำการฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เยื่อที่ได้จะมีค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก เยื่อที่ฟอกด้วย

เอนไซม์แลกเคสเพียงอย่างเดียว และเยื่อที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเอนไซม์แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน นอกจากนี้ในเอนไซม์แลกเคสก็มีเอนไซม์ไซแลนเนสปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งเอนไซม์ไซแลนเนสอาจเข้าไปช่วยเปิดผิวของเส้นใย โดยทำปฏิกิริยากับไซแลนและไปตัดสายโซ่ของสารประกอบคาร์บอไฮเดรตกับลิกนินที่เรียกว่า lignin-carbohydrate complex ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้สะดวกยิ่งขึ้น ลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น ความขาวสว่างจึงมีค่าเพิ่มขึ้น




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, L = Laccase

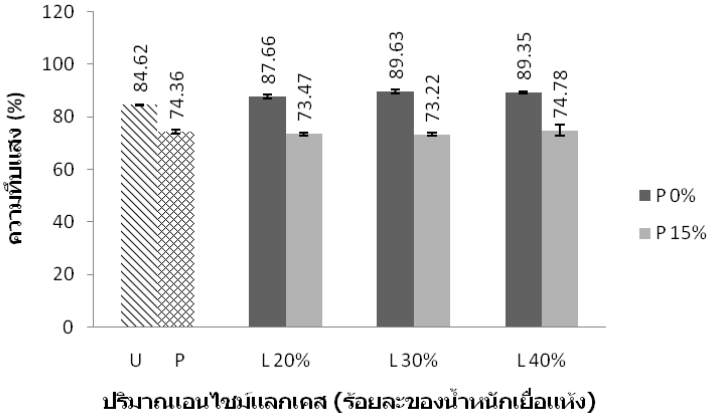
**ภาพที่** 4-23 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์แลกเคสในระดับต่างๆ ร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-10 พบว่า ปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่ใช้กลับส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความขาวสว่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.2.6 **ความทึบแสง**

จากภาพที่ 4-24 แสดงค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสที่ระดับต่างๆ ก่อนที่จะฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ได้มีค่าต่ำกว่าแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่าน

การฟอก และมีค่าใกล้เคียงกับเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อมีผลต่อความทึบแสงมากกว่าปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่ใช้ โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แลกเคสเพียงอย่างเดียว ค่าความทึบแสงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่าเยื่อที่ไม่ฟอกเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลจากสีของเอนไซม์ที่ทำให้เยื่อมีสีหม่นลง ความทึบแสงของกระดาษจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์แล้วมาทำการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อพบว่า ค่าความทึบแสงลดลงอย่างมากจนมีค่าใกล้เคียงกับการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว แม้นการปรับสภาพด้วยเส้นใยด้วยเอนไซม์ก่อนจะส่งผลให้เส้นใยมีความยาวลดลงและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลงก็ตาม




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, P = $H_2O_2$, L = Laccase

**ภาพที่** 4-24 ผลของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์แลกเคสในระดับที่เพิ่มขึ้นร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ให้ค่าความทึบแสงหลังการฟอกเยื่อของแผ่นทดสอบมีทิศทางไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-10 กลับพบว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์แลกเคสไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีมีค่า P-value เท่ากับ 0.076 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

**ตารางที่** 4-10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษและเส้นใยโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor

| สมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ | P-value | $F_{cal}$ | $F_{crit}$ |
|---|---|---|---|
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW | 0.574 | 0.590 | 4.256 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก | 0.472 | 0.817 | 4.256 |
| ความโค้งงอของเส้นใย | 0.159 | 2.269 | 4.256 |
| ความหักงอของเส้นใย | 0.076 | 3.489 | 4.256 |
| ความกว้างของเส้นใย | 0.817 | 0.206 | 4.256 |
| ความหนาแน่นปรากฏ | 0.463 | 0.798 | 3.443 |
| ความเรียบ | 0.676 | 0.399 | 3.443 |
| ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง | 0.000* | 17.139 | 3.443 |
| ดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีก | 0.179 | 1.864 | 3.443 |
| ความขาวสว่าง | 0.000* | 28.067 | 3.443 |
| ความทึบแสง | 0.076 | 2.899 | 3.443 |

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

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติจากตารางที่ 4-10 เพื่อศึกษาผลของการใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด พบว่าปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่ใช้มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงและความขาวสว่างของแผ่นทดสอบเท่านั้น โดยเมื่อใช้เอนไซม์แลกเคสที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด ในขณะที่ความขาวสว่างเมื่อใช้เอนไซม์แลกเคสที่ระดับ 20 และ 30 ของน้ำหนักเยื่อแห้งมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้เอนไซม์แลกเคสที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ในการทำการทดลองตอนต่อไป

### 4.3.3 ผลของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนส เอนไซม์แลกเคส และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษจากต้นข้าวโพด

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.5 เป็นผลของการลำดับการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนส (X) เอนไซม์แลกเคส (L) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (P) โดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและเอนไซม์แลกเคสที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 15 ของ

น้ำหนักเยื่อแห้ง โดยมีลำดับการฟอกเยื่อ 3 ลำดับ คือ 1) ฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส จากนั้นนำเยื่อมาฟอกต่อด้วยเอนไซม์แลกเคส และฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือใช้สัญญลักษณ์ XLP 2) ฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์แลกเคส จากนั้นนำเยื่อมาฟอกต่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนส และฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือใช้สัญญลักษณ์ LXP และ 3) ฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับเอนไซม์แลกเคส โดยใส่เอนไซม์ทั้งสองชนิดพร้อมกัน จากนั้นนำเยื่อมาฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือใช้สัญญลักษณ์ (X+L)P โดยการฟอกเยื่อในขั้น X ใช้เวลา 60 นาที ขั้น P ใช้เวลา 60 นาที ขั้น (X+L) ใช้เวลา 60 นาที และขั้น P ใช้เวลา 90 นาที

#### 4.3.3.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า ลำดับการฟอกเยื่อ XLP และ LXP ให้ผลความยาวเส้นใยและลักษณะของเส้นใยที่ได้จากการฟอกเยื่อไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสหรือเอนไซม์แลกเคสในการปรับสภาพของเส้นใยในงานวิจัยนี้ สามารถใช้เอนไซม์ชนิดใดก่อนก็ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดร่วมกัน (X+L)P พบว่าความยาวของเส้นใยกลับเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความโค้งงอ และความหักงอของเส้นใยกลับลดลง โดยที่ความกว้างของเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดร่วมกันในการปรับสภาพเยื่อนั้น แม้ปริมาณดูเหมือนจะเพิ่มเป็นสองเท่า หากแต่เวลาที่ใช้ยังเท่าเดิม เหมือนกับที่ใช้เอนไซม์แต่ละตัวเดี่ยวๆ คือ 1 ชั่วโมง ดังนั้นเอนไซม์จึงอาจมีเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เต็มที่ จึงส่งผลต่อความยาวของเส้นใยและลักษณะของเส้นใยไม่มากนัก

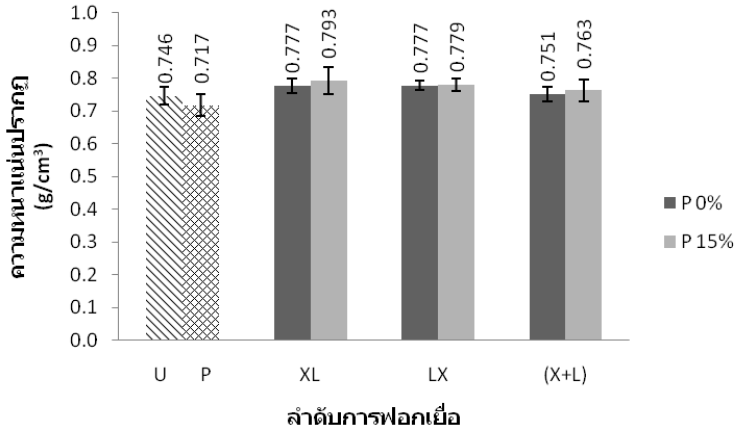
จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-12 พบว่าลำดับของการใช้เอนไซม์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย เนื่องจากค่า P-value ของความยาวของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความโค้งงอของเส้นใย ความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย มีค่าเท่ากับ 0.465, 0.575, 0.132, 0.058 และ 0.591 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

**ตารางที่ 4-11** ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

| สัณฐานวิทยาของเส้นใย | เยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก | เยื่อที่ฟอกด้วย $H_2O_2$ เพียงอย่างเดียว | ลำดับการฟอกเยื่อ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | XLP | LXP | (X+L)P |
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร) | 1.132 ±0.041 | 1.173 ±0.007 | 1.076±0.049 | 1.081±0.017 | 1.113±0.058 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (เปอร์เซ็นต์) | 34.04 ±1.041 | 28.18 ±0.578 | 37.53±1.855 | 37.76±1.932 | 36.03±3.300 |
| ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย | 0.089 ±0.003 | 0.105 ±0.007 | 0.144±0.004 | 0.143±0.009 | 0.134±0.008 |
| ดัชนีความหักงอของเส้นใย | 1.434 ±0.104 | 1.748 ±0.112 | 2.438±0.070 | 2.425±0.070 | 2.264±0.136 |
| ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร) | 18.43 ±0.096 | 19.25 ±0.129 | 17.83±0.150 | 17.90±0.115 | 17.93±0.150 |

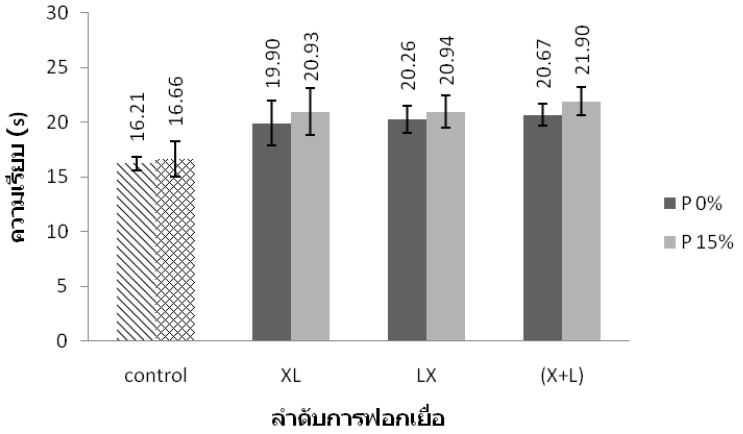
#### 4.3.3.2 **ความหนาแน่นปรากฏและความเรียบ**

จากภาพที่ 4-25 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ที่มีลำดับการฟอกต่างกันร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าที่ลำดับการฟอกเยื่อต่างๆ คือ XLP, LXP และ (X+L) P ให้ค่าความหนาแน่นของกระดาษไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว พบว่าค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์มีค่าเพิ่มขึ้น และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-12 พบว่าลำดับของการใช้เอนไซม์ในการปรับสภาพเยื่อไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นปรากฏ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.129 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, X = Xylanase, L = Laccase, P = $H_2O_2$

**ภาพที่** 4-25 ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความหนาแน่น
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด



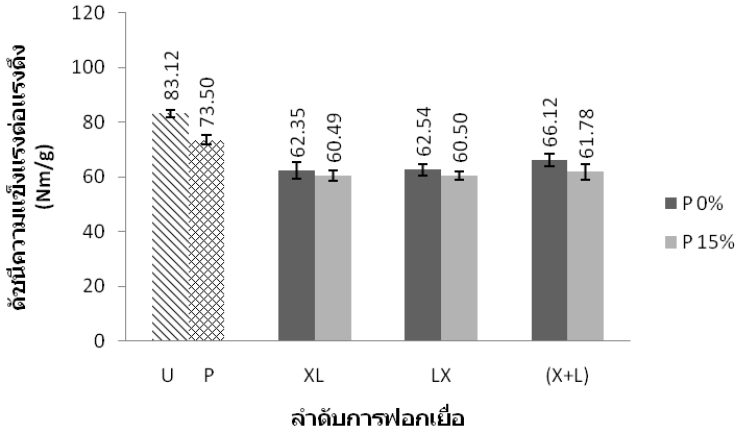

**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, X = Xylanase, L = Laccase, P = $H_2O_2$

**ภาพที่** 4-26 ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความเรียบ
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากภาพที่ 4-26 แสดงค่าความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ที่มีลำดับการฟอกต่างกันร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าที่ลำดับการฟอกเยื่อต่างๆ คือ XLP, LXP และ (X+L) P ให้ค่าความเรียบของแผ่นทดสอบไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าความรียบของแผ่นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการวิเคราะห์ทาง

สถิติ ดังแสดงในตาราง 4-12 พบว่าลำดับของการใช้เอนไซม์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความเรียบ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.338 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.3.3 **ความแข็งแรงต่อแรงดึง**




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, X = Xylanase, L = Laccase, P = $H_2O_2$

**ภาพที่** 4-27 ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากภาพที่ 4-27 แสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ที่มีลำดับการฟอกต่างกันร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าที่ลำดับการฟอกเยื่อ XLP และ LXP นั้น ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ลำดับการฟอกเยื่อ (X+L)P ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่า XLP และ LXP เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์ในกรณีของ (X+L)P นั้นน้อยกว่า XLP และ LXP จึงอาจส่งผลให้เส้นใยถูกทำลายน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว พบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตมาจากเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์มีค่าลดลง เนื่องจากเอนไซม์ไซแลนเนสจะไปตัดสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสในส่วนของไซแลน ในขณะที่เอนไซม์แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนินตรงโครงสร้างที่เป็นฟีนอลิก (phenolic structure) ซึ่งเป็นโมโนเมอร์ (monomer) พื้นฐานของลิกนิน ทำให้โครงสร้างของลิกนินถูกทำลาย เอนไซม์ทั้งสองชนิดทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ดีขึ้น โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจเข้า

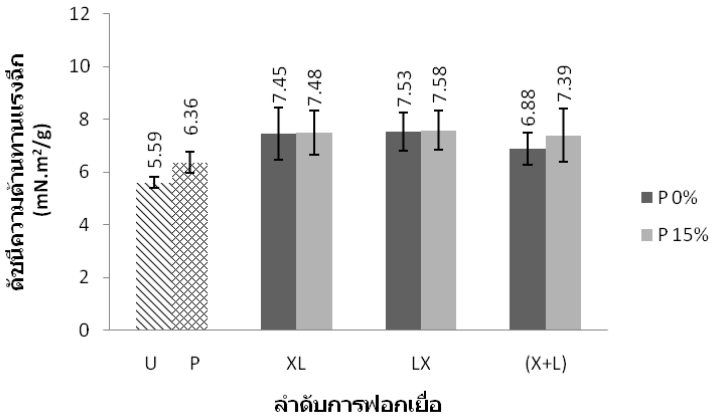
ไปทำปฏิกิริยากับเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสด้วย จึงอาจส่งผลให้คาร์บอไฮเดรตของเส้นใยลดลง การรับน้ำของเส้นใยจึงลดลง การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้อยลง ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษซึ่งขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยจึงลดลง

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-12 พบว่าลำดับของการใช้เอนไซม์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.301 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

#### 4.3.3.4 **ดัชนีความต้านทานแรงฉีก**

จากภาพที่ 4-28 แสดงค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ที่มีลำดับการฟอกต่างกันร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าที่ลำดับการฟอกเยื่อ XLP และ LXP นั้น ให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ลำดับการฟอกเยื่อ (X+L)P ให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่า XLP และ LXP เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเยื่อด้วยเอนไซม์ในกรณีของ (X+L)P นั้นน้อยกว่า XLP และ LXP จึงอาจส่งผลให้เส้นใยถูกทำลายน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว พบว่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตมาจากเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกนี้ อาจเนื่องมาจากการที่ค่าความโค้งงอและการหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น [37] จึงอาจส่งผลให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นได้

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตาราง 4-12 พบว่าลำดับของการใช้เอนไซม์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก เนื่องจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.889 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

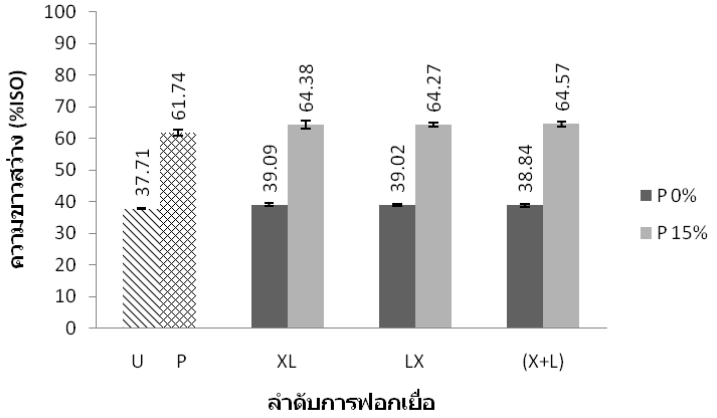



**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, X = Xylanase, L = Laccase, P = $H_2O_2$

**ภาพที่** 4-28 ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

#### 4.3.3.5 **ความขาวสว่าง**

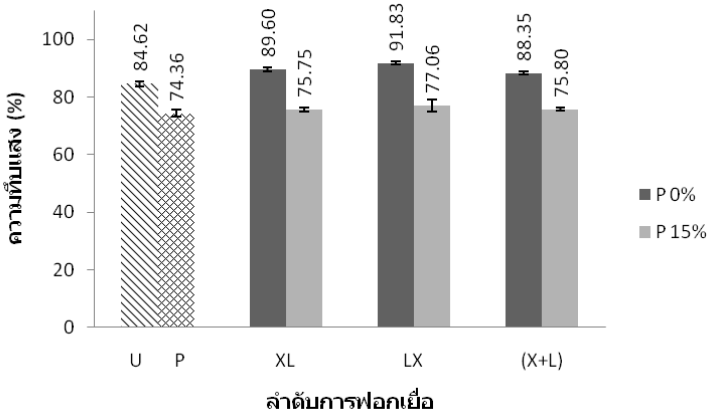
จากภาพที่ 4-29 แสดงค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ที่มีลำดับการฟอกต่างกันร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าที่ลำดับการฟอกเยื่อต่างๆ คือ XLP, LXP และ (X+L) P ให้ค่าความขาวสว่างไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเทียบกับแผ่นทดสอบที่ผลิตมาจากเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกหรือฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวแล้ว พบว่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพของเยื่อด้วยเอนไซม์ทั้งสองชนิด ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินและสามารถกำจัดลิกนินออกได้ดีขึ้น และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-12 พบว่าลำดับของการใช้เอนไซม์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความขาวสว่าง เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.760 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, X = Xylanase, L = Laccase, P = $H_2O_2$

**ภาพที่** 4-29 ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความขาวสว่าง
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

### 4.3.3.6 **ความทึบแสง**




**หมายเหตุ U = ไม่ผ่านการฟอก, X = Xylanase, L = Laccase, P = $H_2O_2$

**ภาพที่** 4-30 ผลของลำดับการฟอกเยื่อต่อความทึบแสง
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพด

จากภาพที่ 4-30 แสดงค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเมื่อทำการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ที่มีลำดับการฟอกต่างกันร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าลำดับการฟอกเยื่อต่างๆ คือ XLP, LXP และ (X+L)P ให้ค่าความทึบแสง

ของกระดาษใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเทียบกับค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตมาจากเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกนั้นพบว่า การปรับสภาพด้วยเอนไซม์ก่อนที่จะฟอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ค่าความทึบแสงลดลง จนมีค่าใกล้เคียงกับความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-12 พบว่าลำดับของการใช้เอนไซม์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสง เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.061 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

**ตารางที่ 4-12** ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการลำดับการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษและเส้นใยโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor

| สมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ | P-value | $F_{cal}$ | $F_{crit}$ |
|---|---|---|---|
| ความยาวเส้นใยแบบ LWW | 0.465 | 0.835 | 4.256 |
| ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก | 0.575 | 0.588 | 4.256 |
| ความโค้งงอของเส้นใย | 0.132 | 2.557 | 4.256 |
| ความหักงอของเส้นใย | 0.058 | 3.976 | 4.256 |
| ความกว้างของเส้นใย | 0.591 | 0.557 | 4.256 |
| ความหนาแน่นปรากฏ | 0.129 | 2.209 | 3.354 |
| ความเรียบ | 0.338 | 1.130 | 3.354 |
| ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง | 0.301 | 1.256 | 3.354 |
| ดัชนีดัชนีความต้านทานแรงฉีก | 0.889 | 0.119 | 3.354 |
| ความขาวสว่าง | 0.760 | 0.277 | 3.354 |
| ความทึบแสง | 0.061 | 3.010 | 3.354 |

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

จากตารางที่ 4-12 จะเห็นได้ว่าสำหรับในงานวิจัยนี้ลำดับของการใช้เอนไซม์ในการฟอกเยื่อนั้นไม่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 และมีค่า $F_{cal}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่า $F_{crit}$

### 4.3.4 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ได้จากการใช้เอนไซม์ในการฟอกเยื่อร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

**ตารางที่ 4-13** สมบัติของแผ่นทดสอบที่ได้จากการใช้เอนไซม์ในการฟอกเยื่อร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

| สมบัติของแผ่นทดสอบ | ลำดับการฟอกเยื่อ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P | XP | LP | LXP | XLP | (X+L)P |
| ความหนาแน่นปรากฏ ($g/cm^3$) | 0.72 ± 0.04 | 0.75 ± 0.02 | 0.77 ± 0.02 | 0.79 ± 0.04 | 0.78 ± 0.02 | 0.76 ±0.03 |
| ความเรียบ (sec) | 16.66 ±1.61 | 19.94 ± 0.57 | 17.81 ± 1.46 | 20.93 ± 2.13 | 20.94 ±1.45 | 21.90 ±1.28 |
| ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g) | 73.50 ±1.66 | 63.83 ±2.95 | 72.95 ± 1.29 | 60.49 ± 1.88 | 60.50 ±1.55 | 61.78 ±2.70 |
| ดัชนีความต้าน ทานแรงฉีก ($mN\ m^2/g$) | 6.36 ± 0.41 | 7.08 ±0.57 | 6.57 ±0.48 | 7.48 ±0.83 | 7.58 ± 0.75 | 7.39 ±1.00 |
| ความขาวสว่าง (%ISO) | 61.74 ±1.00 | 67.54 ±0.93 | 68.50 ±0.99 | 64.38 ±1.25 | 64.27 ±0.56 | 64.57 ±0.75 |
| ความทึบแสง (%) | 74.36 ±0.90 | 73.11 ±1.25 | 73.47 ±0.67 | 75.75 ±1.25 | 77.06 ±0.67 | 75.80 ± 0.92 |

หมายเหตุ P = 15% Hydrogen peroxide, X = 20% Xylanase, L = 20% Laccase

#### 4.3.4.1 ความหนาแน่นปรากฏและความเรียบ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นปรากฏและความเรียบของแผ่นทดสอบที่ฟอกด้วยเอนไซม์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้ความหนาแน่นปรากฏและความเรียบของแผ่นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความหนาแน่นปรากฏและความเรียบของแผ่นทดสอบที่ฟอกด้วยเอนไซม์เพียงชนิดเดียวร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว

#### 4.3.4.2 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นทดสอบที่ได้จากการใช้เอนไซม์ในการฟอกเยื่อร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า ความแข็งแรงต่อแรงดึง

ของแผ่นทดสอบที่ฟอกด้วยเอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ค่าสูงสุด โดยมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบเมื่อผ่านการฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและเอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าลดลงมื่อเทียบกับการฟอกด้วยเอนไซม์เพียงชนิดเดียวและฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องจากการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดอาจเป็นภาวะที่รุนแรงจนส่งผลในทางลบต่อความแข็งแรงต่อแรงดึง

#### 4.3.4.3 **ดัชนีความต้านทานแรงฉีก**

เมื่อเปรียบเทียบดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ฟอกด้วยเอนไซม์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตาราง 4-13 พบว่า การใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดร่วมกันทำให้แผ่นทดสอบมีค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าแผ่นทดสอบที่ฟอกด้วยเอนไซม์เพียงชนิดเดียวร่วมกับไฮโดรเจนปอร์ออกไซด์และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในกรณีของการใช้เอนไซม์สองชนิดพร้อมกันน้อยกว่าการใช้เอนไซม์สองชนิดแต่ใช้ทีละชนิด เส้นใยจึงอาจถูกทำลายน้อยกว่า

#### 4.3.4.4 **ความขาวสว่าง**

เมื่อเปรียบเทียบความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ได้จากการฟอกด้วยเอนไซม์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตาราง 4-13 พบว่า การใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบสูงที่สุด ในขณะที่การใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบต่ำกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียวร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิด สีของเอนไซม์ส่งผลให้เยื่อสีคล้ำลง

#### 4.3.4.5 **ความทึบแสง**

เมื่อเปรียบเทียบความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ฟอกด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้กระดาษมีค่าความทึบแสงสูงกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียวร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่เยื่อมีสีคล้ำลงมากขึ้นเมื่อใช้เอนไซม์สองชนิดร่วมกัน จึงทำให้เยื่อสามารถดูดกลืนแสงไว้ได้มากขึ้น ความทึบแสงจึงเพิ่มขึ้น

# บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

### 5.1.1 ผลการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพดด้วยวิธีโซดา

จากการนำลำต้นข้าวโพดมาศึกษาหาภาวะการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาพบว่า เมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มขึ้น ทำให้ผลผลิตของเยื่อเพิ่มขึ้น (จนกระทั่งถึงปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ที่ผลผลิตของเยื่อลดลง) ปริมาณด่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงฉีก ความเรียบ และความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อและความทึบแสงมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับร้อยละ 20 เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำกว่าร้อยละ 20 ให้ความแข็งแรงของแผ่นทดสอบต่ำและมีปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อมาก ส่วนปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงกว่าร้อยละ 20 พบว่าให้ผลผลิตเยื่อลดลงและมีปริมาณด่างหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเหลืออยู่ในระบบมาก

### 5.1.2 ผลของการฟอกเยื่อจากต้นข้าวโพดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ฟอกแล้ว การฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ค่าความขาวสว่าง ความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้น แต่กลับทำให้ความหนาแน่นปรากฏ ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความทึบแสงลดลง การใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นปรากฏและความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทึบแสงและความเรียบมีค่าลดลง ส่วนปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลองต่อไปคือที่ร้อยละ 15 เนื่องจากให้ค่าความขาวสว่างสูงสุดและให้ค่าความแข็งแรงของแผ่นทดสอบไม่แตกต่างจากที่ปริมาณอื่นๆ

### 5.1.3 ผลการศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและ/หรือแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพด

#### 5.1.3.1 ผลของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพด

เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว พบว่าการใช้เอนไซม์ไซแลนเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ ทำให้ความขาวสว่าง ความเรียบ ความหนาแน่นปรากฏ ความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความทึบแสงลดลง การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสในปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความเรียบเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อความหนาแน่นปรากฏ ความต้านทานแรงฉีก ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความขาวสว่าง และความทึบแสง ส่วนปริมาณเอนไซม์ไซแลนเนสที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลองต่อไปคือที่ร้อยละ 20 เนื่องจากให้ค่าความขาวสว่างและความแข็งแรงไม่แตกต่างจากที่ปริมาณอื่นมากนัก

**5.1.3.2 ผลของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพด**

ผลการทดลองที่ได้จากการใช้เอนไซม์แลกเคสค่อนข้างไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองที่ได้จากเอนไซม์ไซแลนเนส คือ เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว พบว่าการใช้เอนไซม์แลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ ทำให้ความขาวสว่าง ความเรียบ ความหนาแน่นปรากฏ ความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความทึบแสงลดลง การใช้เอนไซม์แลกเคสในปริมาณมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง แต่ไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อความหนาแน่นปรากฏ ความเรียบ ความต้านทานแรงฉีก ความขาวสว่างและความทึบแสง ส่วนปริมาณเอนไซม์แลกเคสที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลองต่อไปคือที่ร้อยละ 20 เนื่องจากให้ค่าความขาวสว่างและความแข็งแรงไม่แตกต่างจากที่ปริมาณอื่นมากนัก

**5.1.3.3 ผลของการฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพด**

การใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ลำดับการฟอกเยื่อต่างกัน และมีลำดับการฟอกเยื่อคือ XLP, LXP และ (X+L)P โดยที่ X คือ เอนไซม์ไซแลนเนส L คือ เอนไซม์แลกเคส และ P คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองพบว่าลำดับการฟอกเยื่อ XLP, LXP และ (X+L)P ส่งผลต่อความหนาแน่นปรากฏ ความเรียบ ความขาวสว่างและความทึบแสงไม่แตกต่างกัน หากแต่ในส่วนของความแข็งแรงต่อแรงดึงและความต้านทานแรงฉีกนั้นพบว่า ลำดับการฟอกเยื่อ XLP และ LXP ให้ผลไม่ต่างกัน แต่ (X+L)P ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ภายหลังการฟอกเยื่อควรมีการหาค่าคัปปานัมเบอร์ (kappa number) ซึ่งจะบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลือในเยื่อ รวมถึงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่เปลี่ยนไป

5.2.2 ควรทำการทดลองฟอกเยื่อด้วยเอนไซม์โดยใช้เวลาและอุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

5.2.3 ควรมีการทดลองฟอกเยื่อโดยใช้เอนไซม์ไซแลนเนสและแลกเคสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในหลายๆ ระดับเพื่อทดสอบว่าการใช้เอนไซม์ช่วยลดการใช้สารเคมีได้มากน้อยเพียงใด

# รายการอ้างอิง


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

[2] Sjöström, E. and Alén, R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Berlin: Springer-verlag, 1999.

[3] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996.

[4] Casey, J.P. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. 3rded. Vol I. New York: John Wiley & Sons, 1980.

[5] Gullichsen, J. and Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology : Chemical Pulping Book 6A. Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000.

[6] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper technologists. 2nd edition. Vancouver: Angus Wilde, 1994.

[7] Lignin structure [online]. (n.d.). Available form: www.lsuagcenter.com/en/our_offices /departments/Audubon_Sugar_Institute/news/potential+market+for+biorefinery+ lignin.htm [2011, August 9]

[8] สมควร ดีรัศมี. การปลูกข้าวโพด. กรุงเทพฯ : แสงปัญญาเลิศ, 2542.

[9] อำพล เสนาณรงค์. การปลูกข้าวโพดในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร, 2515.

[10] คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. พืชเศรษฐกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.

[11] วิชาการเกษตร, กรม. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, 2547.

[12] วิชาการเกษตร, กรม. ข้าวโพด. กรุงเทพฯ: ธนประดิษฐ์การพิมพ์, 2524.

[13] Ahmed A. and Zhu, J, Y. Cornstalk as a Source of Fiber and Energy. In 3rd International Symposium on Emerging Technology of Pulping and Papermaking, Guangzhou, 2006, pp 1-4. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.

[14] Sixta, H. Handbook of Pulp. Vol II. Weinheim: Weley-VCH, 2006.

[15] Xylane structure [online]. (n.d.). Available form: www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html [2011, August 9]

[16] Xylanase enzyme [online]. (n.d.). Available form: www.sigmaaldrich.com/life-science/metabolomics/enzyme-explorer/learning-center/carbohydrate-analysis/carbohydrate-analysis-ii.html [2010, December 1]

[17] Shatalov, A.A., and Pereira, H. "Effect of Xylanase on Peroxide Bleachability of Eucalypt (*E.globulus*) Kraft Pulp", Biochemical Engineering Journal, 40(1), 2008:19-26.

[18] Jime´nez, L., Navarro, E., Ferrer, J.L., Lope´z, F., and Ariza J., "Biobleaching of Cellulose Pulp from Wheat Straw with Enzymes and Hydrogen Peroxide", Process Biochemistry, 35(1-2), 1999: 149 –157.

[19 Bissoon, S., Christov, L., and Singh, S., "Bleach Boosting Effects of Purified Xylanase from *Thermomyces lanuginosus* SSBP on Bagasse Pulp", Process Biochemistry 37(6), 2002: 567–572.

[20] Camarero, S., Ibarra, D., Marti'nez, A.T., Romero, J., Guti'errez, A., Del Ri'o, J.C., "Paper Pulp Delignification Using Laccase and Natural Mediators", Enzyme and Microbial Technology 40(5), 2007:1264-1271

[21] Ninawe, S., and Kuhad, R. C., "Bleaching of Wheat Straw-Rich Soda Pulp with Xylanase from a Thermoalkalophilic *Streptomyces cyaneus* SN32", Bioresource Technology, 97(18), 2006: 2291–2295.

[22] สุธิดา มุลาลินน์, การผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อด้วยไซลาเนสของหญ้าคา *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. และหญ้าแฝก *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. , วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[23] T 258 om-02, Basic density and moisture content of pulpwood, TAPPI Test Methods. Atlanta: TAPPI Press, 2002.

[24] T 200 sp-01, Laboratory Beating of Pulp (Valley Beater Method), TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002.

[25] T 277 om-94, Freeness of Pulp (Canadian Standard Method), TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002.

[26] T 236 om-99, Kappa Number of Pulp, TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002.

[27] SCAN-N 33:94, Residual Alkali (Hydroxide Ion Content), Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, 1994.

[28] ISO 16065-1:2001, Determination of fibre length by automated optical analysis -- Part 1: Polarized light method, International Organization for Standarization, 2001.

[29] ISO 5269-2, Pulp Preparation of Laboratory Sheets for Physical Testing, International Organization for Standardization, Switzerland, 1998.

[30] T 525 om-02, Diffuse brightness of pulp (*d*/0). TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.

[31] T 519 om-02, Diffuse Opacity of Paper (*d*/0° Paper Backing), TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.

[32] T 494 om-01, Tensile Properties of Paper and Paperboard (Using Constant Rate of Elongation Apparatus), TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.

[33] T 414 om-98, Internal Tearing Resistance of Paper (Elmendorf-Type Method), TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.

[34] Prasongsuk, S., Lotrakul, P., Imai, T., and Punnapayak, H., Decolourization of Pulp Mill Wastewater using Thermotolerant White Rot Fungi, ScienceAsia, 35, 2009, 37-41.

[35] Somogyi, M., 1952, Notes on Sugar Determination, Journal of Biological Chemistry, 195: 19-23.

[36] Nelson, N.1944. A photometric adaptation of the somogi method for the determination of glucose. J. Biol. Chem. 153: 375-370

[37] Joutsimo, O., Wathén R., and TamminenT., Effects of fiber deformations on pulp sheet properties and fiber strength, : 1-13.

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

## การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและการเตรียมเยื่อ

### 1. วิธีการหาความชื้นของลำต้นข้าวโพดแห้ง

นำลำต้นข้าวโพดที่ตัดเป็นท่อนมาชั่งน้ำหนักก่อนอบ หลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นของต้นข้าวโพด ดังสูตรต่อไปนี้

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

### 2. วิธีการคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ

ยกตัวอย่างของภาวะที่มีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักต้นข้าวโพดแห้ง กำหนดให้น้ำหนักลำต้นข้าวโพดมีน้ำหนัก 170 กรัม มีความชื้นร้อยละ 10 และในการต้มเยื่อกำหนดให้มีค่าของเหลวต่อน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (L: W) เป็น 9 ต่อ 1

**- หาน้ำหนักข้าวโพดแห้ง จากความชื้นร้อยละ 10**

น้ำหนักต้นข้าวโพด 100 กรัมจะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 100-10= 90 กรัม

ถ้าน้ำหนักต้นข้าวโพดแห้ง 170 กรัมจะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ (170×90)/100= 153 กรัม

**- หาอัตราส่วนปริมาณของเหลวทั้งหมด จากค่า L: W = 9:1**

น้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้งที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 153 กรัมดังนั้นปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อคือ 9×153 = 1377 กรัม

**- หาปริมาณสารเคมีที่ต้องเติม**

โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง

น้ำหนักข้าวโพดแห้ง 100 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม

ถ้าน้ำหนักข้าวโพดแห้ง 153 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ (153×20)/100 = 30.6 กรัม

แต่เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีการเตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 180 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจะต้องตวงปริมาตรสารละโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังนี้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ 180 กรัมจาก สารละลาย 1000 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30.6 กรัม ดังนั้นต้องตวงสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ (30.6×1000)/180 = 170 มิลลิลิตร

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม = ปริมาตรของเหลวทั้งหมด-ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์-ปริมาตรความชื้นในข้าวโพด

ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม = 1377-170-17 = 1190 มิลลิลิตร

**3. วิธีการคำนวณเยื่อในการบดเยื่อ**

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

ความชื้นร้อยละ 75 แสดงว่าเมื่อชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม จะมีเยื่อแห้งอยู่ 25 กรัม เยื่อแห้ง 25 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม

เยื่อแห้ง 360 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้นเท่ากับ (360×100)/25 =1440 กรัม

ดังนั้นต้องชั่งเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 75 มา 1440 กรัมถึงจะได้เยื่อแห้ง 360 กรัมน้ำหนักแห้ง และพบว่ามีน้ำอยู่ในเยื่อแล้ว 1440-360 = 1080 กรัม ดังนั้นจะต้องเติมน้ำเพิ่มลงไปอีก 21920 กรัม เพื่อที่จะทำให้น้ำเยื่อที่พร้อมก่อนการบดมีความเข้มข้นร้อยละ 1.56

**4. วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness)**

เตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้การหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อต้องใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร และจะใช้น้ำเยื่อจาก

เครื่องบดเยื่อซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 1.56 ดังนั้นจะใช้สูตรดังต่อไปนี้ในการตวงปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ $C_1$ = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

$C_2$ = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อคือ ร้อยละ 1.56

$V_1$ = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นอิสระของเยื่อ คือ 1000 มิลลิลิตร

$V_2$ = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ

$$0.3\times1000 = 1.56\times V_2$$

$$V_2 = (0.3\times1000)/1.56$$

$V_2$ = 192 มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.56 มา 192 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ

**5. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อไว้ใช้สำหรับการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ**

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นชิ้นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.02 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 ตารางเมตร ดังนั้นถ้าจะทำการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งดังนี้

แผ่นชิ้นทดสอบ 1 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 60 กรัม

ถ้าแผ่นชิ้นทดสอบมีขนาด 0.0315 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $60\times0.0315 = 1.89$ กรัม

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 1.89 กรัมในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นชิ้นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร แต่ละภาวะจะทำการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ 15 แผ่น ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $1.89\times15 = 28.35$ กรัม เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำ

เยื่อในเครื่องบดเยื่อมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56 ดังนั้นเราจะต้องตวงน้ำเยื่อออกมาปริมาตรเท่าไรให้มีเยื่อหนักเท่ากับ 28.35 กรัม โดยวิธีการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 1.56 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ต้องการน้ำหนักเยื่อ 28.35 กรัม ต้องตวงน้ำเยื่อมาจากในเครื่องบดเยื่อเท่ากับ (28.35×100)/1.56 = 1817 มิลลิลิตร

นำปริมาตรน้ำเยื่อที่คำนวณได้จากเครื่องบดเยื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ หลังจากนั้นทำการคำนวณปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น เนื่องจากแผ่นชิ้นทดสอบขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อ 1.89 กรัม ดังนั้นจะต้องทำการตวงน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้มีน้ำหนักเยื่อ 1.89 โดยการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ต้องการน้ำหนักเยื่อ 1.89 ต้องตวงมาจากน้ำเยื่อเท่ากับ (1.89×100)/0.3 = 630 มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อจำนวน 630 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่นก็จะได้น้ำหนักแผ่นชิ้นทดสอบที่มีขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร

**6. การคำนวณหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพด**

กำหนดให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่จะใช้ในการฟอกเยื่อเท่ากับ 15% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้มีความเข้มข้น 30% ดังนั้นในการคำนวณจึงใช้สูตรดังนี้

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ $C_1$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 30%

$C_2$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต้องตวง

$V_1$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต้องการคือ 15%

$V_2$ = น้ำหนักของเยื่อทีใช้ในการฟอก คือ 100 กรัม

$$30 \times C_2 = 15 \times 100$$

$$C_2 = (15 \times 100)/30$$

$$C_2 = 50 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการฟอกเยื่อจากลำต้นข้าวโพดที่มีน้ำหนักแห้ง 100 กรัม

# ภาคผนวก ข

## อาหารเลี้ยงเชื้อและวิธีเตรียม

1. Yeast Malt Agar (YMA)

| | |
|---|---|
| Yeast extract | 5 กรัม |
| Malt extract | 5 กรัม |
| Bacto peptone | 5 กรัม |
| น้ำตาลกลูโคส | 20 กรัม |
| วุ้น | 15 กรัม |

ละลายส่วนผสมทั้งหมดยกเว้นวุ้นด้วยน้ำกลั่น แล้วเติมวุ้นจากนั้นนำไปต้มจนวุ้นละลายหมด ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตรแล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอ

2. Yeast Malt Broth (YMB)

| | |
|---|---|
| Yeast extract | 5 กรัม |
| Malt extract | 5 กรัม |
| Bacto peptone | 5 กรัม |
| น้ำตาลกลูโคส | 20 กรัม |

ละลายส่วนผสมแต่ละชนิดด้วยน้ำกลั่น โดยละลายแยกกัน แล้วนำมาผสมกัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

3. Xylanase Production Medium (XPM)

| | |
|---|---|
| น้ำตาลไซแลน | 10 กรัม |
| Yeast-nitrogenous base | 6.7 กรัม |
| Asperagine | 2 กรัม |
| $KH_2PO_4$ | 5 กรัม |

ละลายส่วนผสมแต่ละชนิดด้วยน้ำกลั่น โดยละลายแยกกัน แล้วนำมาผสมกัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

4. อาหารสูตร Potato Dextrose Agar (PDA)

| | |
|---|---|
| มันฝรั่ง | 200 กรัม |
| น้ำตาลกลูโคส | 20 กรัม |
| วุ้น | 15 กรัม |
| น้ำกลั่น | 1000 มิลิลิตร |

ปลอกเปลือกมันฝรั่งและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ สี่เหลี่ยมลูกเต๋า นำไปต้มกับน้ำกลั่นจนปี่อยและกรองเอาแต่น้ำ หลังจากนั้นเติมน้ำตาลกลูโคสและผงวุ้น ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

5. อาหารสูตร Production medium

| | |
|---|---|
| Glucose | 4 กรัม |
| Yeast extract | 0.5 กรัม |
| Peptone | 0.5 กรัม |
| $KH_2PO_4$ | 0.04 กรัม |
| $K_2HPO_4$ | 0.1 กรัม |
| $MgSO_4.7H_2O$ | 0.05 กรัม |

ละลายสารดังกล่าวให้เข้ากัน ปรับปริมาตรโดยใช้ Volumetric flask ให้มีปริมาตรสุดท้าย 1000 มิลลิลิตร

# ภาคผนวก ค

## 1. การวัดแอคติวิตีของเอนไซม์ไซแลนเนส

2.1 การเตรียมสารเคมีสำหรับวัดเอคติวิตีเอนไซม์ไซแลนเนส

2.1.1 Reagent A

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

ละลายสารดังกล่าวให้เข้ากัน ปรับปริมาตรโดยใช้ Volumetric flask ให้มีปริมาตรสุดท้าย 1000 มิลลิลิตร

2.1.2 Reagent B (Copper alkaline reagent)

| | |
|---|---|
| $CuSO_4$ | 15 กรัม |

ละลายสารดังกล่าวแล้วปรับปริมาตรโดยใช้ Volumetric flask ให้มีปริมาตรสุดท้าย 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 หยด

2.1.3 Reagent C

ปิเปต 25 มิลลิลิตรของ Reagent A ผสมกับ 1 มิลลิลิตรของ Reagent B (ต้องเตียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้)

2.1.4 Reagent D

ชั่ง Ammonium molybdate 25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 450 มิลลิลิตร เติม 21 มิลลิลิตร ของกรดซัลฟูริกเข้มข้น กวนให้เข้ากัน จากนั้นเติม 3 กรัมของ $Na_2HASO_4.7H_2O$ ที่ละลายอยู่ในน้ำ 50 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นนำสารละลายที่ได้ใส่ขวดสีชาและนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน

2.2 การวัดเอคติวิตี้ของเอนไซม์ไซแลนเนส

2.2.1 เติมเอนไซม์ปริมาตร 0.25 มิลลิตร ลงในหลอดทดลอง

2.2.2 เติมไซแลนความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (w/v) และ 50 mM Sodium phosphate buffer pH 7.0 ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร

2.2.3 นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

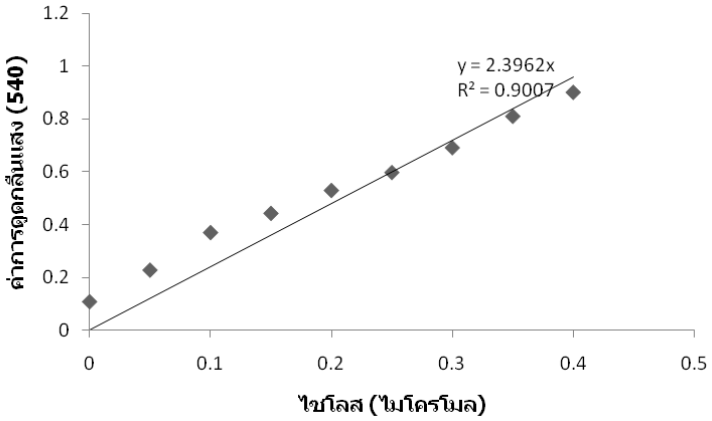
2.2.4 เติมสารละลาย Reagent C ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดนาน 20 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2.2.5 เติมสารละลาย Reagent D ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2.2.6 เติมน้ำกลั่นหลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเปรียบเทียบหาปริมาณน้ำตาลไซโลสจากกราฟมาตรฐาน

2.3 การสร้างกราฟน้ำตาลมาตรฐาน

การสร้างกราฟน้ำตาลไซโลสมาตรฐานทำได้โดย เตรียมสารละลายไซโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 25 50 75 100 125 150 และ 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติม Reagent C หลอดละ 0.5 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำเดือด 20 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น เติม Reagent D หลอดละ 1 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นหลอดละ 5 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟการดูดกลืนแสงกับปริมาณน้ำตาลไซโลส ดังรูป




**กราฟปริมาณไซโลสมาตรฐาน**

2.4 การคำนาณค่าแอคติวิตีของเอนไซม์ไซแลนเนส

การคำนวณค่า Unit of enzyme ตามวิธีของ The International Union of Biochemistry ในการหา Unit of enzyme ของไซแลนเนส

กำหนดให้ 1 หน่วยของเอนไซม์ คือ ปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสารตั้งต้นให้เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย 1 ไมโครกรัม ใน 1 นาที ภายใต้ภาวะที่ใช้ทดสอบ นั่นคือ

1 หน่วยเอนม์ = 1 ไมโครโมลของสารตั้งต้นที่ถูกย่อยใน 1 นาที
= 1 ไมโครโมลของไซโลสที่ถูกปลดปล่อยออกมาใน 1 นาที
= 0.150 มิลลิกรัมของไซโลสที่ถูกปลดปล่อยออกมาใน 1 นาที

สูตรในการคำนวณ

$$\text{Units/ml enzyme} = \frac{(\text{ปริมาณน้ำตาลที่คำนวณได้จากกราฟ}) \times (\text{Df})}{10 \times 0.25}$$

โดยที่ Df = Dilution factor
10 = ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดปริมาณไซแลนเนส (นาที)
0.25 = ปริมาตรของเอนไซม์ที่ใช้ในการศึกษา

**2. การวัดแอคติวิตีของเอนไซม์แลคเคส**

2.1 การเตรียม reaction mixture ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ประกอบด้วย

| | |
|---|---|
| 30 mM ABTS | 0.1 มิลลิลิตร |
| 0.1 M Sodium acetate buffer (pH 5) | 0.7 มิลลิลิตร |
| Laccase | 0.2 มิลลิลิตร |

2.2 นำ reaction mixture ซึ่งประกอบด้วยสารละลายในข้อ 2.1 มาผสมกันใน corvette แล้วนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เป็นเวลา 1 นาที โดยมีแบลงค์เป็นสารละลายดังกล่าวที่ไม่มีการเติมแลคเคส

2.3 การคำนวณหาค่าหน่วยของแลคเคส

1 หน่วยของแลคเคส คือ ปริมาณของแลคเคสที่สามารถออกซิไดซ์ 1 ไมโครโมล ของ ABTS ใน 1 นาที เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร จากสูตร

$$\text{Volume Activity (U/ml)} = \frac{\Delta\ \text{A/min} \times \text{Volume reaction mixture} \times 1000}{3600 \times 1 \times \text{Volume enzyme}}$$

420 นาโนเมตร = 3600 $m^{-1}.cm^{-1}$

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวสุภาภรณ์ ฤทธิ์กล้า เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดเพชรบุรี

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพรหมานุสรณ์ จังหวัดเพชรบุรี
- ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

ผลงานวิชาการ

- Ritgla, S., Prasongsuk, K. and Chaiarrekij, S. (2010). Effect of Xylanase Combined with Hydrogen peroxide on Bleachability of Corn stalk pulp.The 1st National/International Silpakorn Graduate Study Conference 2011. 10-11 May 2011. Bangkok, Thailand. pp. 1445-1449.