การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อราเน่าขาว *Phanerochaete chrysosporium* สำหรับการผลิตเยื่อแบบโซดา

นางสาวฐิตารินีย์ สุโรพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRETREATMENT OF CORN STALK USING WHITE ROT FUNGI *Phanerochaete chrysosporium* FOR SODA PULPING.

Miss Thitarini Suropan

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 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อราเน่าขาว *Phanerochaete chrysosporium* สำหรับการผลิตเยื่อแบบโซดา
โดย	นางสาวฐิตาริณีย์ สุโรพันธ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาบดี)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ภูวดี ตู้จินดา)

ฐิตารินีย์ สุโรพันธ์ : การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อราเน่าขาว *Phanerochaete chrysosporium* สำหรับการผลิตเยื่อแบบโซดา (PRETREATMENT OF CORN STALK USING WHITE ROT FUNGI *Phanerochaete chrysosporium* FOR SODA PULPING) อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก : อ.ดร.สีหนาท ประสงค์สุข, 161 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อราเน่าขาวชนิด *Phanerochaete chrysosporium* สำหรับการผลิตเยื่อแบบโซดา การทดลองเริ่มจากการหาภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% และ 20% ของน้ำหนักข้าวโพดแห้งและใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1 และ 2 ชั่วโมง ทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าภาวะการต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าความแข็งแรงของกระดาษสูงสุด การทดลองขั้นต่อไปเป็นการใช้เชื้อราเน่าขาว *P. chrysosporium* ปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้ปริมาณ 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เป็นเวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน จากนั้นนำไปผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาโดยใช้ภาวะการต้มเยื่อที่เหมาะสมของการผลิตเยื่อแบบโซดาที่ได้หาไว้แล้วตอนต้น ผลจากการศึกษาการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ก่อนการต้มเยื่อ คือ ปริมาณเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น และเวลาในการปรับสภาพ 5 วัน เนื่องจากให้ปริมาณผลผลิตที่ได้สูงสุดและสมบัติด้านความแข็งแรงค่อนข้างสูง เมื่อนำผลที่ได้จากการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อเน่าขาวในภาวะนี้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเยื่อที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อราเน่าขาว พบว่า การปรับสภาพด้วยเชื้อราเน่าขาวทำให้สามารถลดความต้องการในการใช้สารเคมีในการต้มเยื่อลง เยื่อที่ผลิตได้มีปริมาณโฮโลเซลลูโลส ความยาวเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษเพิ่มขึ้น หากแต่ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ สภาพระบายได้ของเยื่อ ความพรุน ความหนาแน่นปรากฏ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษลดลง ในขณะที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณผลผลิตเยื่อ ความเรียบ และสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต ....

ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

5172274023 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY
KEYWORDS : CORN STALK / PRETREATMENT / SODA PULPING / WHITE ROT FUNGI / *PHANEROCHAETE CHRYSOSPORIUM*

THITARINI SUROPAN : PRETREATMENT OF CORN STALK USING WHITE ROT FUNGI *Phanerochaete chrysosporium* FOR SODA PULPING.THESIS ADVISOR : SEHANAT PRASONGSUK, Ph.D., 161 pp.

In this research, pretreatment of corn stalk using white rot fungus. *Phanerochaete chrysosporium* for soda pulping was carried out. The experiment was started by varying sodium hydroxide dosage of 15% and 20% based on oven dried (O.D.) corn stalk chip weight and cooking time of 1 hr and 2 hr with 120 ^{o}C cooking temperature to find the optimal condition of soda pulping. It was found that the optimal condition was using sodium hydroxide dosage of 20% and cooking time of 1 hr since it provided highest strength properties. Next experiment was the pretreatment of corn stalk chips using the fungus *P. chrysosporium* with the dosage of 10 and 20 plugs for the incubation time of 5, 10, 20 and 30 days. After pretreatment, the pulp was made using the optimal condition of soda pulping process previously determined. The results indicated that the optimum condition for pretreatment of corn stalk chips was 10 plugs of *P. chrysosporium* and 5 day incubation period since it offered the highest pulp yield and quite high strength properties. The pretreatment of corn stalk chips potentially decreased the cooking chemical consumption as compared to regular soda pulping. Pretreated pulp had higher holocellulose content, longer fiber length, higher fines content and higher tear index but lower kappa number, lower freeness, decreased porosity, reduced appearance density, lower tensile index and lower burst index than non-pretreated pulp. However, the pretreatment of corn stalk wood chip did not change alpha cellulose content, pulp yield, sheet smoothness and the optical properties.

Field of Study : Pulp and Paper Technology Student's Signature ....
Academic Year : 2009 Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ ผู้ทำหน้าที่เสมือนอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาบดี และ ดร. ภูวดี ตู้จินดา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโครงการวิทยาเพื่อพื้นถิ่นตามแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนตลอดงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เพื่อน พี่และน้องๆ ในสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีการพิมพ์และภาควิชาพฤกษศาสตร์ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ แนะนำและเป็นกำลังใจในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆ น้องๆ เพื่อนทุกคนที่เป็นกำลังใจสนับสนุนและช่วยเหลือการวิจัยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย..	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...	จ
กิตติกรรมประกาศ..	ฉ
สารบัญ..	ช
บทที่ 1 บทนำ..	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี...	5
2.1.1 อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ...	5
2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อ..	6
2.1.3 ข้าวโพด..	13
2.1.4 กระบวนการผลิตเยื่อ...	17
2.1.5 กระบวนการผลิตกระดาษ..	20
2.1.6 สมบัติของกระดาษและการทดสอบ...	21
2.1.7 เทคโนโลยีชีวภาพในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ............................	24
2.1.8 เชื้อราเน่าขาว *Phanerocaete chrysosporium*..	25
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..	31
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี..	31
3.1.1 วัสดุและสารเคมี...	31
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย...	31
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย..	33
3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ...	33
3.2.2 การทดลองส่วนที่ 1 : หาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด	33
3.2.3 การทดลองส่วนที่ 2 : การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่การผลิตเยื่อแบบโซดา..	36

หน้า

3.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจากการทดลอง ผลิตเยื่อด้วยลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้เชื้อราเน่าขาวกับการผลิตด้วยลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา..................... 38
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล... 39
4.1 ผลการผลิตเยื่อกระดาษจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด ในภาวะต่างๆ... 39
4.2 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาว *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา.. 44
4.2.1 ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ.. 45
4.2.2 ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย... 47
4.2.3 ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย.. 49
4.2.4 ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ... 50
4.2.5 ปริมาณผลผลิตเยื่อ... 52
4.2.6 ความยาวเส้นใย.. 54
4.2.7 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก... 56
4.2.8 สภาพระบายได้.. 58
4.2.9 ความพรุน... 60
4.2.10 ความเรียบ... 62
4.1.11 ความหนาแน่นปรากฏ... 63
4.1.12 ความทึบแสง.. 65
4.1.13 ความขาวสว่าง.. 67
4.1.14 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง... 69
4.1.15 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ... 71
4.1.16 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด... 73
4.3 ภาวะที่ดีในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* 76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ... 81
5.1 สรุปผลการวิจัย.. 81
5.1.1 ภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด........ 81
5.1.2 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาว*P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา... 82

หน้า

5.1.3 ภาวะที่ดีสำหรับการใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา................................ 83

5.1.4 เปรียบเทียบผลของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกับการผลิตเยื่อโดยไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา.. 84

5.1.5 ความเป็นไปได้ในการนำกระดาษที่ผลิตได้ไปใช้งานจริง........................... 85

5.2 ข้อเสนอแนะ.. 86

รายการอ้างอิง.. 88

ภาคผนวก.. 94

ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลดิบ.. 95

ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ทางสถิติ.. 118

ภาคผนวก ค ภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.. 154

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์... 161

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่		หน้า
2.1	อนุกรมวิธานของข้าวโพด…………………………………………………………..	14
2.2	ลักษณะของเส้นใย องค์ประกอบทางเคมีของไม้ และกระบวนการที่เหมาะสมของลำต้นข้าวโพดเปรียบเทียบกับเส้นใยจากไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน………..	17
4.1	สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดโดยการผลิตเยื่อแบบโซดาในภาวะต่างๆ………………………………………………………………………	39
4.2	ค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดโดยการผลิตเยื่อแบบโซดาในภาวะต่างๆ………………	40
4.3	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ………………………………………………………...	45
4.4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ…………………………	47
4.5	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย…………………………………………………………..	47
4.6	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณโฮโลเซลลูโลส…………………………………..	48
4.7	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย………………………………………………………..	49
4.8	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลส………………………………..	50
4.9	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ………………………………………………………...	51
4.10	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ………………………	52
4.11	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ………………………………………………………………………..	52
4.12	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ………………………………....	53

ตารางที่ หน้า

4.13 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความยาวเส้นใยของเยื่อ.. 55

4.14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความยาวเส้นใย... 56

4.15 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก.. 56

4.16 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก..................................... 58

4.17 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ.. 58

4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสภาพระบายได้... 59

4.19 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความพรุนของกระดาษ.. 60

4.20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความพรุนของกระดาษ....................................... 61

4.21 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความเรียบของกระดาษ.. 62

4.22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความเรียบของกระดาษ....................................... 63

4.23 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ.. 64

4.24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ.......................... 65

4.25 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษ.. 65

4.26 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษ..................................... 67

4.27 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษ.. 67

ตารางที่		หน้า
4.28	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษ.................................	68
4.29	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ..	70
4.30	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ..................	71
4.31	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ..	71
4.32	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ............	72
4.33	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ...	73
4.34	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ.............	74
4.35	สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เป็นเวลา 5 วัน เปรียบเทียบกับเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ..	76
4.36	ค่า P-value ของสมบัติของเยื่อและกระดาษเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เป็นเวลา 5 วัน กับการไม่ปรับสภาพ....................	77
5.1	สรุปภาวะที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ให้ผลดีที่สุดในการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด..	81
5.2	สรุปผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาว *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา..	82
5.3	ผลของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ...	84
5.4	สมบัติของกระดาษที่ผลิตจากการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่า *P. chrysosporium* ในภาวะที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับสมบัติของกระดาษตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือพิมพ์และกระดาษเหนียว...	86
ก.1	ปริมาณผลผลิตเยื่อข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1................................	96

ตารางที่		หน้า
ก.2	ความยาวเส้นใยข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1…………………..................	96
ก.3	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1……………………...	97
ก.4	ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1…………..…...	97
ก.5	ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1…………..…...	98
ก.6	ความหนาแน่นปรากฏข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1…………...………….	98
ก.7	ความทึบแสงข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1……………..…………….….	99
ก.8	ความขาวสว่างข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1……………..………………	99
ก.9	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1……………..…….	100
ก.10	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1……………..	100
ก.11	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 1……………..	101
ก.12	ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………..……	102
ก.13	ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใยข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………..…..	103
ก.14	ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………..…..	104
ก.15	ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2………..……	105
ก.16	ปริมาณผลผลิตเยื่อข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2……………..………..…..	106
ก.17	ความยาวเส้นใยข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………………………..…..	107
ก.18	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2………...………..…..	108
ก.19	สภาพระบายได้ข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………………………...…..	109
ก.20	ความพรุนข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2……………………………..……..	110
ก.21	ความเรียบข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………………………………...…..	111
ก.22	ความทึบแสงข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2………….………………………	112
ก.23	ความขาวสว่างข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………………….……..…..	113
ก.24	ความหนาแน่นปรากฏข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2……………….……..…..	114
ก.25	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………….……...	115
ก.26	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………..……	116
ก.27	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดข้อมูลดิบจากการทดลองส่วนที่ 2…………….....	117
ข.1	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณผลผลิตเยื่อจากการทดลองส่วนที่ 1…………	119
ข.2	การวิเคราะห์ทางสถิติของความยาวเส้นใยจากการทดลองส่วนที่ 1……………..	120
ข.3	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการทดลองส่วนที่ 1…….	121

ตารางที่		หน้า
ข.4	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อจากการทดลองส่วนที่ 1…………………………………………………………………………………..	122
ข.5	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อจากการทดลองส่วนที่ 1…………………………………………………………………………………	123
ข.6	การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นปรากฏจากการทดลองส่วนที่ 1 ……..	124
ข.7	การวิเคราะห์ทางสถิติของความทึบแสงจากการทดลองส่วนที่ 1………………...	125
ข.8	การวิเคราะห์ทางสถิติของความขาวสว่างจากการทดลองส่วนที่ 1……………....	126
ข.9	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการทดลองส่วนที่ 1…	127
ข.10	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจากการทดลองส่วนที่ 1…………………………………………………………………………………..	128
ข.11	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดจากการทดลองส่วนที่ 1…………………………………………………………………………………..	129
ข.12	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน ………..........................	130
ข.13	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา….........	131
ข.14	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา….........	131
ข.15	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน……………………..	132
ข.16	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน……………………..	133
ข.17	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา…….	134
ข.18	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา….....	134
ข.19	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน……………………..	135
ข.20	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณผลผลิตเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน……………………………………..	136

ตารางที่		หน้า
ข.21	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณผลผลิตเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา……………………	137
ข.22	การวิเคราะห์ทางสถิติของความยาวเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา………………………..	137
ข.23	การวิเคราะห์ทางสถิติของความยาวเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน………………………………………..	138
ข.24	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน………………………………....	139
ข.25	การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา………………..	140
ข.26	การวิเคราะห์ทางสถิติของสภาพระบายได้จากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา………………………..	140
ข.27	การวิเคราะห์ทางสถิติของสภาพระบายได้จากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน………………………………………..	141
ข.28	การวิเคราะห์ทางสถิติของความพรุนจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน………………………………………………	142
ข.29	การวิเคราะห์ทางสถิติของความพรุนจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา……………………….....	143
ข.30	การวิเคราะห์ทางสถิติของความเรียบจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา……………………….....	143
ข.31	การวิเคราะห์ทางสถิติของความเรียบจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน………………………………………………	144
ข.32	การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นปรากฏจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน………………………………..	145
ข.33	การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นปรากฏจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา………………....	146
ข.34	การวิเคราะห์ทางสถิติของความทึบแสงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา…………………………	146
ข.35	การวิเคราะห์ทางสถิติของความทึบแสงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน………………………………………..	147

ตารางที่		หน้า
ข.36	การวิเคราะห์ทางสถิติของความขาวสว่างจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน……………….………………………….	148
ข.37	การวิเคราะห์ทางสถิติของความขาวสว่างจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา………………………..	149
ข.38	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา…………	149
ข.39	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน…………………….…..	150
ข.40	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน……………….…..	151
ข.41	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา…...	152
ข.42	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา…...	152
ข.43	การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน……………………...	153

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะเส้นใยจากพืช……………………………………………………………..	8
2.2	องค์ประกอบของเส้นใย…………………………………………………………….	8
2.3	โครงสร้างของเซลลูโลส……………………………………………………….....	11
2.4	องค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลส……………………………………………..	12
2.5	โครงสร้างของลิกนิน………………………………………………………………..	13
2.6	ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นข้าวโพด……………………………………..	15
2.7	ขั้นตอนการผลิตเยื่อเคมี………………………………………………………….	19
2.8	กระบวนการผลิตกระดาษ……………………………………………………….	21
2.9	ลักษณะของกลุ่มเส้นใยหลังถูกปรับสภาพด้วยเชื้อรา………………………..	25
2.10	เส้นใยของเชื้อรา *Phanerocaete chrysosporium*…………………………..	26
2.11	ปฏิกิริยาของ lignin peroxidase………………………………………………..	27
3.1	*Phanerocaete chrysosporium* อายุ 7 วัน…………………………………….	36
3.2	ชิ้นของลำต้นข้าวโพดที่มีเชื้อ *P. chrysosporium* เจริญเติบโต…………………	37
4.1	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ………………………………………………………..	45
4.2	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย…………………………………………………………..	48
4.3	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย……………………………...……………………..	49
4.4	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ……………………………………………………...	51
4.5	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ…………………………...…………………………………….	53
4.6	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความยาวเส้นใยของเยื่อ…………………………...………………………………..	55
4.7	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก…………………………...…………………………….	57

ภาพที่		หน้า
4.8	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ……………………………..………………………………	59
4.9	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความพรุนของกระดาษ……………………………...………………………………	61
4.10	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความเรียบของกระดาษ……………………………...……………………………...	62
4.11	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ……………………………..……………………..	64
4.12	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษ……………………………...…………………………...	66
4.13	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษ……………………………...…………………………	68
4.14	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ……………………………...…………	70
4.15	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ……………………………..……	72
4.16	ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ………………………………………..	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีพื้นที่การเพาะปลูกอยู่เกือบทุกภาคของประเทศไทย มีการเก็บเกี่ยวผลผลิตต่อปีสม่ำเสมอ หลังการเก็บเกี่ยวมีการนำเศษเหลือทิ้งจากข้าวโพดมาใช้ประโยชน์น้อยมาก ทั้งที่มีชีวมวลต่อพื้นที่การเพาะปลูกค่อนข้างสูง กอปรทั้งในปัจจุบันการผลิตเยื่อในเชิงพาณิชย์ได้มีการพยายามหาเส้นใยจากพืชชนิดอื่นมาใช้ทดแทนหรือเสริมเส้นใยจากต้นไม้ จากการศึกษาการนำลำต้นข้าวโพดมาผลิตเยื่อกระดาษแบบโซดาในเบื้องต้น พบว่าลำต้นข้าวโพดสามารถใช้ผลิตเยื่อกระดาษได้ เนื่องด้วยเส้นใยมีลักษณะที่สอดคล้องกับความต้องการ ดังนั้นลำต้นข้าวโพดจึงมีแนวโน้มและศักยภาพมากพอในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ กอปรกับในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีชีวภาพในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษมากขึ้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งสามารถลดการใช้สารเคมีและได้คุณภาพของเยื่อและกระดาษที่สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำลำต้นข้าวโพดมาใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษ โดยมีการนำเทคโนโลยีทางชีวภาพมาใช้ร่วมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพด เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา รวมถึงเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้เชื้อราเน่าขาวกับเยื่อและกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 หาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้เชื้อราเน่าขาวกับเยื่อและกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพด โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 15 และ 20 ของน้ำหนักลำต้นแห้ง ใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1 และ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเยื่อคือ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเยื่อไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ ความยาวของเส้นใย ปริมาณผลผลิตที่ได้ และปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ เป็นต้น แล้วนำเยื่อที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อจนได้ค่าสภาพระบายได้ในช่วง 250-280 มิลลิลิตร นำเยื่อที่เหลือไปขึ้นแผ่นกระดาษโดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร จากนั้นนำกระดาษที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความเรียบ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อแรงฉีก เป็นต้น เพื่อหาภาวะของการผลิตเยื่อที่ดีที่สุด จากนั้นหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยนำลำต้นข้าวโพดที่เตรียมไว้มาปรับสภาพด้วยเชื้อราเน่าขาวที่ดัดแปลงจากวิธีของ Sabharwal และคณะ โดยใช้ปริมาณเชื้อราเน่าขาวต่างกันที่ 10 และ 20 ชิ้นวุ้นที่มีเชื้อราอยู่ และใช้เวลาในการปรับสภาพนาน 5, 10, 20 และ 30 วัน โดยมีการเขย่าทุก 5 วัน จากนั้นนำมาผลิตเยื่อโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการต้มเยื่อจากการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพดในข้างต้น แล้วนำเยื่อที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ ความยาวของเส้นใย ปริมาณผลผลิตที่ได้ และปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ เป็นต้น นำเยื่อที่เหลือไปขึ้นแผ่นกระดาษโดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และนำกระดาษที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความเรียบ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและความแข็งแรงต่อแรงฉีก เป็นต้น จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้เชื้อราเน่าขาวกับเยื่อและกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการทดลองจะมีการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อราเน่าขาว เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา รวมถึงเปรียบเทียบสมบัติ

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

เนื่องด้วยช่วงเวลาในการทำงานวิจัยเป็นฤดูฝน สภาวะอากาศมีปริมาณความชื้นในอากาศค่อนข้างสูง หากไม่ควบคุมความชื้นของวัตถุดิบ อาจมีเชื้อราเจริญเติบโตทำความเสียหายแก่วัตถุดิบ เนื่องจากเชื้อราทำลายไม้จะเจริญเติบโตได้ดีที่ความชื้น 20%ขึ้นไป เชื้อราที่อาจก่อความเสียหายแก่วัตถุดิบได้ เช่น เชื้อรา *Aspergillus.sp* เป็นเชื้อราที่มีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เชื้อราชนิดนี้สามารถสร้างเอนไซม์เซลลูเลสในการย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเส้นใยที่นำมาใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การผลิตเยื่อ เป็นการพยายามแยกกลุ่มของเส้นใยออกจากกันให้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการขจัดเอาลิกนินออกหรือไม่มีการขจัดลิกนินออก หากแต่ใช้ความร้อนทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง เพื่อให้สามารถแยกเส้นใยออกจากกันได้ง่ายขึ้น

การผลิตเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นการใช้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์จากจุลินทรีย์มาย่อยชิ้นไม้ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อตามปกติ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลพื้นฐานของการใช้เชื้อราเน่าขาวในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อ

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ค้นคว้าเอกสาร ข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.8.2 ศึกษาวิธีการทดลองและเตรียมเครื่องมือ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง

1.8.3 วางแผนการทดลองและทำการทดลองตามขั้นตอน

1.8.4 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้และสรุปผลการทดลอง

1.8.5 เรียบเรียงเนื้อหาและเขียนวิทยานิพนธ์

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ในการเสนอผลการวิจัยจะเสนอตามผลของสมบัติต่างๆ จากเยื่อและกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* โดยมีการรายงานผลของสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษจากการวิจัยตามลำดับ ดังนี้

1.9.1 ผลการผลิตเยื่อกระดาษจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดในภาวะต่างๆ

1.9.2 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและภาวะที่ดีที่สุดในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา*P. chrysosporium* ของการทดลองนี้

1.9.3 ผลของสมบัติของเยื่อและกระดาษจากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อและกระดาษที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

การทำกระดาษมีมาประมาณ 2,000 ปีแล้ว โดยในยุคแรกเส้นใยที่นำมาใช้ในการทำกระดาษนั้นได้มาจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (non woody plant) จากนั้นการทำกระดาษได้มีการคิดค้นและพัฒนามาเรื่อยจนถึงปัจจุบัน ซึ่งการผลิตกระดาษระดับอุตสาหกรรมเพื่อการค้ามีการใช้ทั้งพืชที่มีเนื้อไม้และพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ในการผลิตเยื่อกระดาษ โดยอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษจัดเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีอัตราการผลิตเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากความต้องการใช้กระดาษมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่เป็นเส้นใยจากลำต้นของต้นไม้ ซึ่งการนำต้นไม้มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษนั้นเป็นการทำให้พื้นที่สีเขียวของโลกลดลง ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและคุณภาพชีวิตของมนุษย์ ส่วนเส้นใยจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้มีการนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทางกระดาษเพียง 6.5% ของทั่วโลก หากแต่ในอนาคตอันใกล้พืชที่ไม่มีเนื้อไม้อาจเป็นแหล่งเส้นใยที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้พืชที่ไม่มีเนื้อไม้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษนั้น ไม่ก่อให้เกิดการตัดไม้ทำลายป่า อีกทั้งยังมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วกว่าพืชที่มีเนื้อไม้ นอกจากนี้หากจะกล่าวถึงปริมาณของพืชที่ไม่มีเนื้อไม้บนโลกพบว่ามีถึงประมาณ 2,500 ล้านตัน สามารถนำมาผลิตเยื่อได้ถึง 1,000 ล้านตัน ซึ่งปัจจุบันปริมาณการบริโภคกระดาษทั่วโลกมีเพียง 330 ล้านตันเท่านั้น จากงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำเส้นใยจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเส้นใยจากพืชที่มีเนื้อไม้ในการผลิตเยื่อและกระดาษ พบว่าเส้นใยจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งบางแห่งก็มีการนำเส้นใยจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้เหล่านี้มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษต่างๆ อาทิเช่น กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษลอนลูกฟูก กระดาษแข็งทำกล่อง กระดาษหนังสือพิมพ์และกระดาษพิเศษ เป็นต้น [1]

2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อ

วัตถุดิบหลักที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ คือ เส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่อาจได้มาจากส่วนต่างๆ ของพืช อาทิเช่น ลำต้น ใบ ผลของพืช เป็นต้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ (wood fiber) และเส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (non woody fiber)

2.1.2.1 เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ (wood fiber)

เป็นเส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ (wood) ของพืชเมล็ดเปลือยในกลุ่มของสน (conifers) และเนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่ เส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของเส้นใยคือ ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) และไม้เนื้ออ่อน (softwood)

- **ไม้เนื้อแข็ง** (hardwood)

เป็นไม้ที่มีลักษณะใบกว้าง (broad leaved) มีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างรวดเร็ว ส่วนใหญ่เป็นเส้นใยจากพืชตระกูลไม้ผลัดใบ (deciduous) อาทิเช่น ยูคาลิปตัส (eucalyptus) โอ๊ค (oak) เมเปิล (maple) และแอสเพน (aspen) เป็นต้น ยกเว้นไม้บางชนิด เช่น สนทะเลและสนปดิพัทธ์ โดยเส้นใยจะมีขนาดเล็ก ละเอียด และมีความแข็งแรงต่ำกว่าเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน เส้นใยมีความยาวเส้นใยประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ความกว้างของเส้นใย 19-22 ไมครอนและมีความหนาของผนังเซลล์ของเส้นใย 3-5 ไมครอน เยื่อที่ได้จากไม้เนื้อแข็งจึงเป็นเยื่อใยสั้น ซึ่งในทางการค้าใช้อักษร “L” (leaved) นำหน้า เช่น LBKP (leaved bleached kraft plup)

- **ไม้เนื้ออ่อน** (softwood)

เป็นพืชที่มีลักษณะใบแคบ เป็นรูปเข็ม ไม่ผลัดใบ มีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้า ส่วนใหญ่เป็นพืชตระกูลสน อาทิเช่น สนสองใบ สนสามใบ สนสปรูซ (spruce) ต้นเฮมลอค (hemlock) เป็นต้น เส้นใยมีความเหนียวและความแข็งแรงสูง โดยมีความยาวเส้นใยประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ความกว้างของเส้นใย 36-43 ไมครอน และมีความหนาของผนังเซลล์ของเส้นใย 5-11 ไมครอน เยื่อที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจึงเป็นเยื่อใยยาว ซึ่งในทางการค้าใช้อักษร “N” (needle) นำหน้าเช่น NBKP (needle bleached kraft plup)

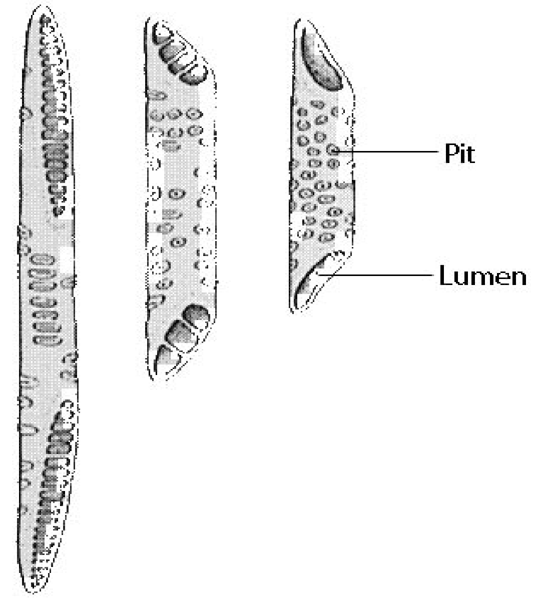
2.1.2.2 **เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้** (non woody fiber)

เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ถูกใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกระดาษเมื่อหลายร้อยปีก่อนที่จะเริ่มใช้เส้นใยจากพืชที่มีเนื้อไม้ พืชที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ฝ้าย ฟางข้าว ชานอ้อย ปอแก้ว ไม้ไผ่ สับปะรด และวัชพืชต่างๆ เป็นต้น โดยเส้นใยจากพืชกลุ่มนี้ได้มาจาก 4 แหล่ง ดังนี้

1. ได้จากพืชที่ปลูกไว้สำหรับนำเส้นใยมาใช้ในการผลิตกระดาษโดยเฉพาะ เช่น ป่าน ปอชวา ปอแก้ว ปอกระเจา เป็นต้น
2. ได้จากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรหลังจากที่นำมาใช้เป็นอาหารแล้ว เช่น เมล็ดธัญพืช ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น
3. ได้จากเศษเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ฝ้าย ลินนิน เศษผ้าลินนิน เป็นต้น
4. ได้จากพืชที่เจริญเติบโตขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น หญ้าที่ขึ้นตามที่รกร้าง ต้นไผ่ ปอสา เป็นต้น [1]

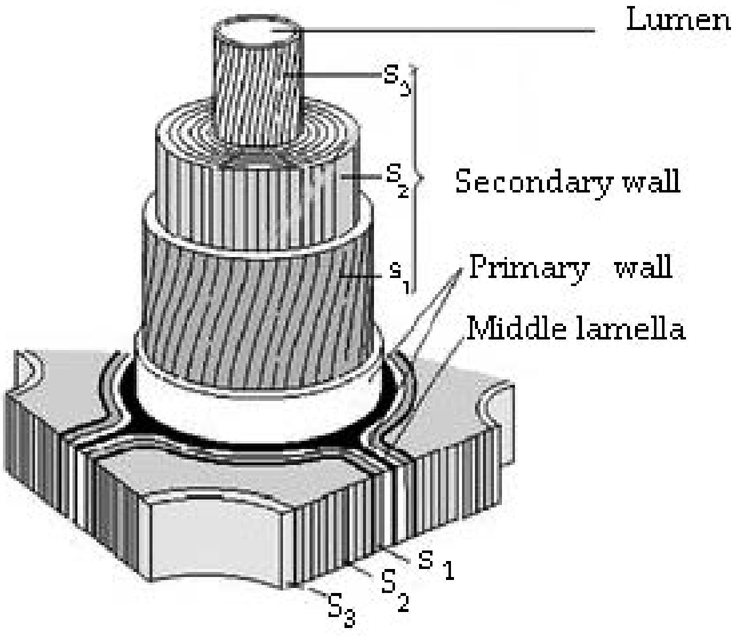
2.1.2.3 **องค์ประกอบของเส้นใย** (fiber structure)

ภายในเนื้อไม้นั้นเส้นใยแต่ละเส้นจะเกาะอยู่รวมกันและถูกเชื่อมด้วยวัสดุที่มีสมบัติเหมือนกาวที่เรียกว่าลิกนิน (lignin) โดยเส้นใยเป็นเซลล์ที่มีลักษณะเหมือนหลอดกลวง ยาวเรียว ปิดหัวปิดท้าย มีผนังเซลล์ ตรงกลางเป็นช่องว่างเรียกว่า ลูเมน (lumen) ผนังด้านข้างมีรูเล็กๆ เรียงอยู่เป็นแนวยาว (pit) เส้นใยของไม้แต่ละชนิดจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามความหนาของผนังเซลล์ ความกว้างของลูเมน (lumen) และลักษณะของรูปิด (pit) ของเส้นใย (ภาพที่ 2.1)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะเส้นใยของพืช [2]

เส้นใยแต่ละเส้นเมื่อนำมาตัดตามขวางแล้วส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงจะพบว่าผนังเส้นใยไม่ได้เป็นวัสดุเนื้อเดียวสม่ำเสมอกันโดยตลอด หากประกอบด้วยผนังย่อยๆ หลายชั้น ซึ่งสามารถแบ่งองค์ประกอบของเส้นใยออกได้ 4 ส่วน คือ middle lamella, primary wall, secondary wall และ lumen (ภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.2 องค์ประกอบของเส้นใย [3]

- middle lamella

middle lamella เป็นส่วนที่อยู่ใกล้ชิดติดกับ primary wall ของเส้นใย 2 เส้นที่อยู่ใกล้ๆ กัน middle lamella มีความหนาประมาณ 1-2 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและสภาวะของการเจริญเติบโตของเส้นใย โครงสร้างมีรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นแผ่นบางๆ ทึบค่อนข้างมีรูมากกว่าผนังเส้นใยและ secondary wall โดย middle lamella มีรูอยู่อย่างหนาแน่นกว่าใน secondary wall ประมาณ 80-90% และเนื่องจากมีปริมาณลิกนินอยู่มาก ทำให้ middle lamella มีความแข็งแรงและมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) อยู่รอบๆเส้นใย โดยในส่วนของ cambial จะมีการสังเคราะห์สารพวกแพคติน (pactin) ขึ้น ซึ่งมีการสะสมจนกลายเป็นเหมือนกาวประสานยึดผนังเส้นใยในระหว่างการเจริญเติบโตของเส้นใย [4]

- primary wall

primary wall ถูกสร้างจากผนังเซลล์ดั้งเดิมของเส้นใย มีลักษณะค่อนข้างบางโดยมีความหนาประมาณ 0.1 ไมครอนเท่านั้น เกิดจาก cellulose fibril ซึ่งความหนาจะเป็นไปตามความกว้างของ cellulose fibril ของต้นไม้ โดย cellulose fibril สานตัวกันอย่างไม่มีทิศทาง และถูกฝังตึงอยู่ในส่วนที่เป็นอสันฐานของ pactic hemicelluloses primary wall จะมีลิกนินอยู่มาก นอกจากนี้ primary wall ยังมีความสามารถในการพองตัวจำกัดและจะแตกออกขณะทำการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารที่ทำให้เกิดการพองตัว [4] primary wall มีปริมาณสัดส่วนของสารประกอบต่างๆ ดังนี้คือ มีเซลลูโลสอยู่ค่อนข้างน้อยประมาณ 25-36% ของน้ำหนักแห้ง เฮมิเซลลูโลส 30% แพคติน 35 % และไกลโคโปรตีน 1-5% ส่วนน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของ primary wall โดยมีน้ำเป็นส่วนประกอบถึง 75% ของมวลรวมของเซลล์

- secondary wall

secondary wall เป็นส่วนที่อยู่ถัดเข้ามาจาก primary wall และ secondary wall มีความหนามากกว่า middle lamella และ primary wall โดย secondary wall จะถูกห้อหุ่มไปด้วยเฮมิเซลลูโลสและมีการสะสมของลิกนินเป็นส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็นชั้นย่อยได้ 3 ชั้น โดยสอดคล้องกับทิศทางการจัดเรียงตัวของ microfibrils ของแต่ละชั้น ซึ่งมีความแตกต่างกันดังนี้ [5]

: S_1 (outer secondary wall)

ชั้นนี้อยู่ใกล้กับ primary wall มากที่สุดและมีความหนาใกล้เคียงกับ primary wall โดย microfibrils ของชั้นนี้จะมีการเรียงตัวแบบบันไดเวียนหรือรูปตัว S และทำมุมกับแกนยาวของเส้นใยประมาณ 60°

: S_2 (middle secondary wall)

ชั้นนี้อยู่ถัดจากชั้น S_1 เข้าไปข้างใน เป็นชั้นที่หนาที่สุด โดยมีความหนาประมาณ 10-30 ไมครอน ในชั้นนี้มีการเรียงตัวของ microfibrils แบบบันไดเวียนหรือก้นหอย (helic) โดยมีความชันมากกว่าชั้น S_1 ทำมุม 10-20° กับแนวแกนยาวของเส้นใย

: S_3 (inner secondary wall)

ชั้นนี้อยู่ถัดจาก S_2 และเป็นชั้นที่อยู่ใกล้กับ lumen โดย microfibrils มีทิศทางการเรียงตัวใกล้เคียงกับแนวตัดขวางมากที่สุด โดยมีลักษณะคล้ายกับรูปตัว Z ในไม้บางชนิดตรงส่วนที่ติดกับ lumen จะมีลักษณะคล้ายกับปุ่มเกิดขึ้นเรียกว่า วาทตี้เลเยอร์ (warty layer)

- lumen

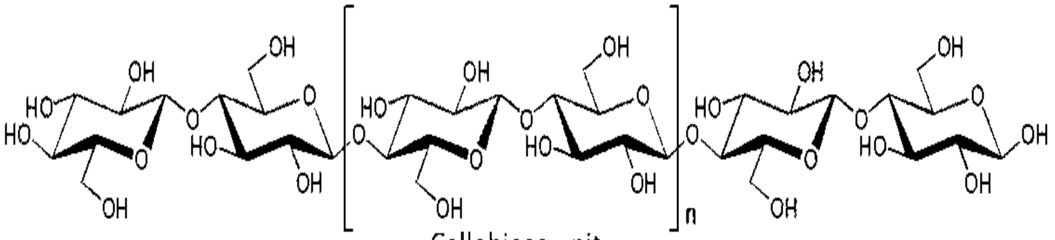
lumen คือบริเวณช่องว่างตรงกลางของเส้นใย ซึ่งจะอยู่ถัดจากชั้น secondary wall เข้าไป [6]

2.1.2.4 **เคมีของเส้นใย** (fiber chemistry)

เคมีของเส้นใยจะประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) และสารแทรก (extractive) [7]

- **เซลลูโลส** (cellulose)

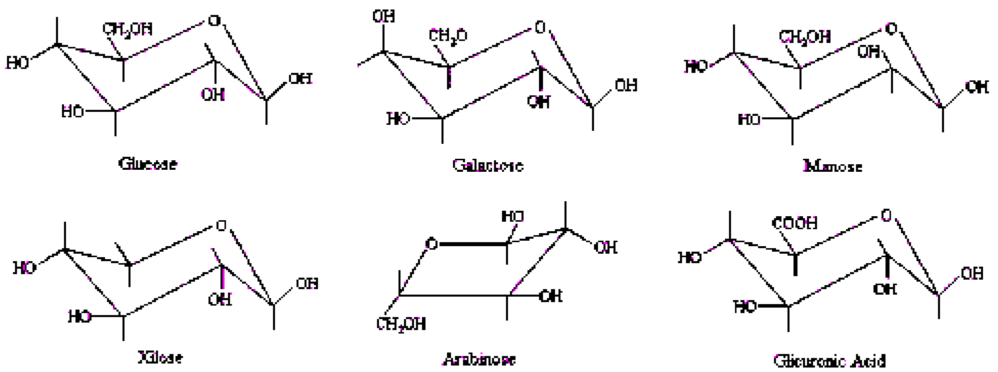
เป็น โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) ของ ดี-กลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย 1,4 β-glucosidic bond โดยมีโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส (glucose) ($C_6H_{10}O_6$) หลายยูนิตต่อกันเป็นพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นเส้นตรง มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย โครงสร้างมี



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส [8]

- **เฮมิเซลลูโลส** (hemicellulose)

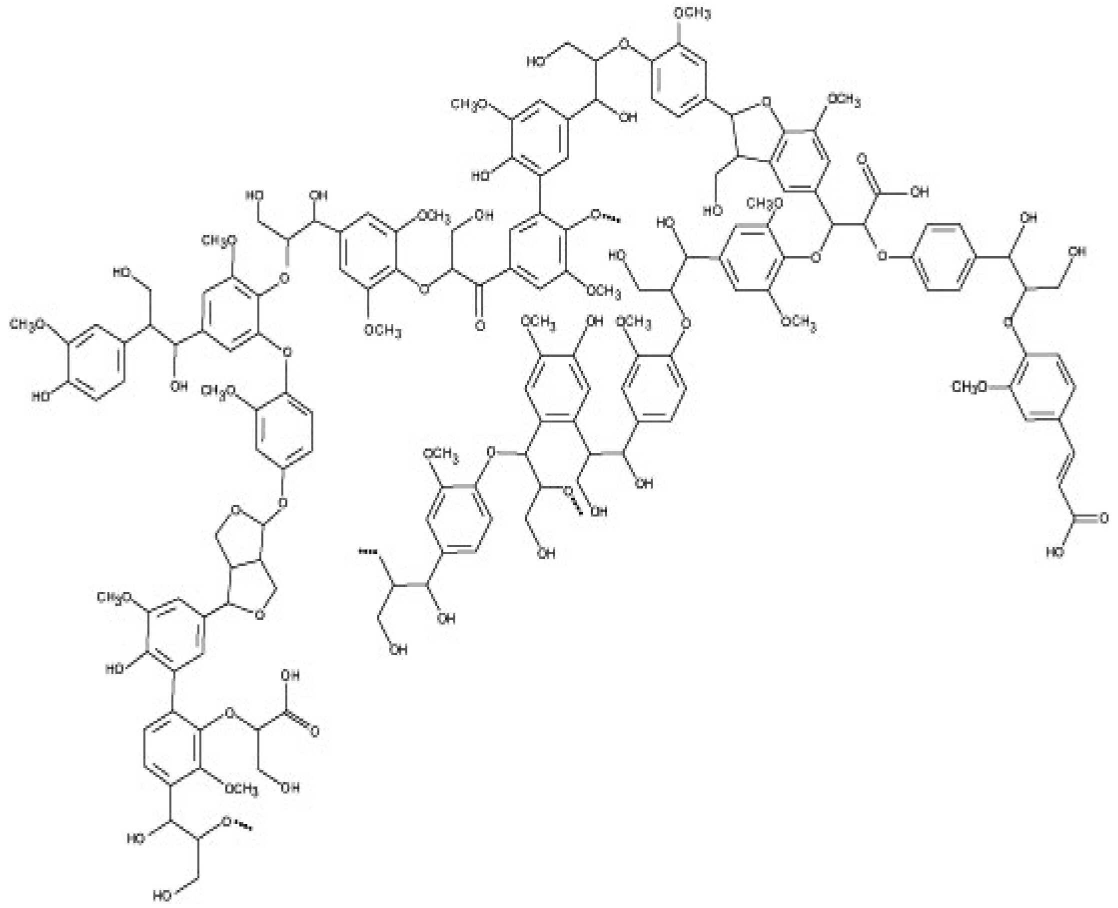
เฮมิเซลลูโลส เป็นเฮทเทอร์โรพอลิเมอร์ (heteropolymer) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาล 5 ชนิด ได้แก่ กลูโคส (gluclose) แมนโนส (mannose) กาแลคโตส (galactose) ซึ่งเป็นน้ำตาล C6 (hexose) และไซโลส (xylose) อราบิโนส (arabinose) ซึ่งเป็นน้ำตาล C5 (pentose) โดยมีระดับของการเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization) ประมาณ 200 หน่วย เฮมิเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสและสลายตัวง่ายกว่า ตัวอย่างเฮมิเซลลูโลสเช่น galatoglucomannan, glucomannan, arabinoglucuronoxylan เป็นต้น มีโครงสร้างเป็นอสันฐาน สามารถอุ้มน้ำและพองตัวได้ดี โดยทั่วไปแล้วเส้นใยจะมีเฮมิเซลลูโลสประมาณ 25-35% ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองลงมาจากเซลลูโลสของเส้นใย โครงสร้างมีลักษณะเป็นกิ่งก้านอยู่ล้อมรอบเซลลูโลสและเชื่อมต่อเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน มีหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับเส้นใย ในไม้เนื้อแข็งเฮมิเซลลูโลสจะเป็นพวกไซแลน ส่วนในไม้เนื้ออ่อนเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่เป็นกลูโคแมนแนน (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลส [9]

- ลิกนิน (lignin)

ปริมาณเฉลี่ยของลิกนินในไม้เนื้ออ่อนมีน้อยกว่า 30% และมีประมาณ 20% สำหรับในไม้เนื้อแข็ง ลิกนินมีอยู่อย่างหนาแน่นในบริเวณ middle lamella และกระจายตัวอยู่มากใน porus ของผนังเซลล์ [4] ลิกนินประกอบด้วย phenyl propane unit เป็นอะโรมาติกพอลิเมอร์ (aromatic polymer) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอีเธอร์และคาร์บอน (ether และ carbon linkages) ซึ่งรวมตัวกัน โดยมีโครงสร้างหลัก (building block) คือ p-coumaryl alcohol (p-hydroxylpheny propanol), coniferyl alcohol (quaiacyl propanol) และ sinapyl alcohol (syringyl propranol) ในไม้เนื้ออ่อนจะพบ coniferyl alcohol เป็นอณูหลัก ส่วนลิกนินในไม้เนื้อแข็งจะก่อตัวเป็น guaiacyl และ syringyl unit ส่วนในพืชตระกูลหญ้าลิกนินจะประกอบด้วย guaiacyl, syringyl และ p-hydroxylpheny unit [10] ซึ่ง phenolic polymer ทำหน้าที่เป็นสารที่ช่วยยึดเส้นใยแต่ละเส้นเข้าด้วยกัน และมีลักษณะทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กโดยมีหลายทิศทางกระจัดกระจาย ลิกนินมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และเนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบจึงถูกทำปฏิกิริยาได้ง่าย (ภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน [11]

- **สารแทรก** (extractive)

เส้นใยจะมีสารแทรกประมาณ 2-8% โดยสารแทรกมีความหลากหลายอยู่เป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ โดยพบอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืชทั่วไป ได้แก่ ลำต้น กิ่ง ราก เปลือกไม้และก้านใบ ตัวอย่างเช่น กรดเรซิน (resin acids) พบใน resin canals สารแทรกแบบฟีนอลิก (phenolic extractive) ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในบริเวณเนื้อไม้และเปลือกไม้ ในขณะที่ไขมันและขี้ผึ้ง (fat และ waxes) พบอยู่ในเซลล์พาเรนไคมา เป็นต้น

2.1.3 **ข้าวโพด** (corn/ maize)

ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตข้าวโพดรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยรองลงมาได้แก่ จีน บราซิล เม็กซิโก อาร์เจนตินา สำหรับการปลูกข้าวโพดในประเทศไทยทำกันมานานกว่า

2.1.3.1 **การจำแนกทางอนุกรมวิธาน** (taxonomic classification)

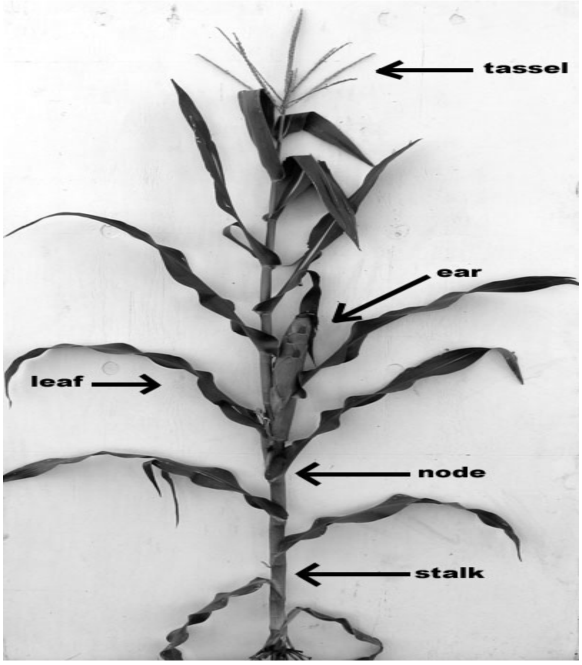
ตารางที่ 2.1 อนุกรมวิธานของข้าวโพด [14]

Kingdom	Plantae
Order	Poales
Family	Poales
Genus	*Zea*
Species	*Zea mays*
Binomial name	*Zea mays* L.

ข้าวโพดมีชื่อเรียกอื่นๆ ในประเทศไทย เช่น ข้าวสาลี สาลี (เหนือ) คง (กระบี่) โพด(ใต้) บือเคเส่ะ (กระเหรียง - แม่ฮ่องสอน) ส่วน maize ได้มาจากภาษาสเปนเป็นคำดั้งเดิมของชาวอินเดียแดงที่ใช้เรียกพืช ซึ่งใช้เรียกในทางวิทยาศาสตร์ ทางการเกษตรและทางการค้า ส่วนใหญ่เป็นชื่อที่เรียกอย่างเป็นทางการที่ใช้กันทั่วโลก สำหรับในอเมริกาและแคนาดาใช้ corn ส่วน indian corn ใช้ในอังกฤษ [15]

2.1.3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ต้นข้าวโพดมีลำต้นแข็ง มีความยาวตั้งแต่ 30 เซนติเมตร จนถึง 8 เมตร แล้วแต่ชนิดพันธุ์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นตั้งแต่ 1.5-4 เซนติเมตร ไส้แน่นไม่กลวง ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บสะสมอาหารจากใบ ตามลำต้นมีข้อ (node) และปล้อง (internode) ปล้องที่อยู่ในดินและใกล้ผิวดินจะสั้นและจะค่อยๆ ยาวขึ้นไปทางด้านปลาย ปล้องเหนือพื้นดินจะมีจำนวนประมาณ 8-20 ปล้อง พันธุ์ข้าวโพดส่วนมากมีลำต้นสดสีเขียว แต่บางพันธุ์มีสีม่วง ลำต้นและตาที่ข้อของลำต้นห่อหุ้มด้วยกาบใบ ซึ่งแตกออกมาจากแต่ละข้อของลำต้น ตาที่ข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อจะสร้างฝักซึ่งมีรังไข่ที่เจริญขึ้นเป็นเมล็ดหลังจากการผสมเกสร ดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน โดยช่อดอกตัวผู้อยู่ส่วนยอดของลำต้น ช่อดอกตัวเมียอยู่ต่ำลงมาโดยอยู่ระหว่างกาบใบและลำต้น ฝักเกิดจากดอกตัวเมียที่เจริญเติบโตแล้ว โดยทั่วไปต้นข้าวโพดแตกกอไม่มากนัก แต่ส่วนมากไม่แตกกอ ทั้งนี้แล้วแต่ชนิดพันธุ์และสิ่งแวดล้อม ข้าวโพดสามารถแตกกอได้ 3-4 ต้น เช่น ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดที่ปลูกสูงกว่าระดับน้ำทะเลมากๆ อาจแตกกอได้ตั้งแต่ 7-10 ต้น แต่หน่อที่แตกออกมาหลังๆ มักไม่มีฝัก [15, 16] (ภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.6 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นข้าวโพด [17]

ในการปลูกข้าวโพดหลังการเก็บเกี่ยวฝักแล้วจะเหลือส่วนของลำต้นข้าวโพด ซึ่งเกษตรกรจะจัดการหลังการเก็บเกี่ยวโดยการเผาทำลาย เนื่องจากลำต้นข้าวโพดมีลักษณะที่แข็งจึงค่อนข้างยากในการไถกลบเหมือนพืชชนิดอื่น การเผาทำลายต้นข้าวโพดนี้ก่อให้เกิดกลุ่มควันและมลพิษทางอากาศแก่ผู้อาศัยโดยรอบ นอกจากนี้ควันยังไปบดบังทัศนวิสัยของผู้สัญจรไปมา อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนอีกด้วย ดังนั้นการนำลำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์หรือนำมาใช้ผลิตเยื่อกระดาษน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่งของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของเกษตรกร โดยสามารถเพิ่มรายได้และเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

2.1.3.3 **การใช้ประโยชน์จากข้าวโพด**

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น เป็นอาหารมนุษย์ ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารสัตว์ปีก ใช้ในอุตสาหกรรมแป้ง เช่น ใช้ผลิตแป้งข้าวโพด ใช้ผลิตเชื้อเพลิง ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ผลิตน้ำมันจากข้าวโพด ในอเมริกาสามารถนำเอาข้าวโพดมาผลิตเป็นเส้นใยสังเคราะห์ เพื่อทอเป็นผ้าที่มีความยืดหยุ่น นอกจากนี้แล้วยังใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มและส่วนผสมของอาหาร [18] และข้าวโพดยังสามารถฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน พีเอเอชและปิโตรเลียม [15] สามารถใช้ผลิตเยื่อกระดาษได้ เนื่องด้วยเส้นใยมีลักษณะที่สอดคล้องกับความต้องการ Reddy และYang [19] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของเส้นใยจากลำต้นข้าวโพด พบว่า เส้นใยจากลำต้นข้าวโพดมีความเป็นผลึกต่ำ มีทิศทางของเส้นใยขนาดย่อย (microfibrils) สูงและเส้นใยมีความแข็งแรงสูง แต่มีความยืดตัวต่ำ สมบัติของเส้นใยจากลำต้นข้าวโพดคล้ายกับเส้นใยปอชวา เหมาะสมที่จะนำไปใช้ผสมและผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอหรือประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นที่ใช้เส้นใยในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ Ahmed และคณะ [20] ศึกษาลำต้นข้าวโพดในด้านที่ใช้เป็นแหล่งของเส้นใยและพลังงาน พบว่าลำต้นข้าวโพดประกอบไปด้วยปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงและปริมาณลิกนินต่ำเมื่อเทียบกับไม้ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานและเส้นใยในการผลิตกระดาษ (ตารางที่ 2.2) และในต่างประเทศยังพบว่า มีประวัติการใช้ลำต้นข้าวโพดในการผลิตกระดาษห่อของและกระดาษแข็ง เช่น ประเทศออสเตรเลีย เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1880 [21]

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของเส้นใย องค์ประกอบทางเคมีของไม้และกระบวนการผลิตเยื่อที่เหมาะสมของลำต้นข้าวโพดเปรียบเทียบกับเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [20]

Fiber source	Average fiber length (mm)	Fiber size diameter (micron	Cellulose (%)	Lignin (%)	Pentosans (%)	Pulping process
Softwood	2.7-4.6	32-43	40-52	26-32	8-12	All
Hardwood	0.7-1.6	20-40	38-50	18-28	15-25	All
Cornstalk	1.0-1.5	18-22	46-50	16-17	27-28	Soda, Kraft

2.1.4 **กระบวนการผลิตเยื่อ** (pulping process)

การผลิตเยื่อ (pulping) เป็นการพยายามแยกกลุ่มของเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการขจัดเอาลิกนินออกหรือไม่มีการขจัดเอาลิกนินออก หากแต่ใช้ความร้อนทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง เพื่อสามารถแยกเส้นใยออกได้ง่ายขึ้น [22] การผลิตเยื่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.1.4.1 **การผลิตเยื่อเชิงกล** (mechanical pulping)

เป็นการใช้แรงกลรวมถึงความร้อนในการแยกเส้นใยออกมา เพื่อนำเส้นใยมาใช้ในการผลิตกระดาษ การผลิตเยื่อด้วยวิธีนี้จะให้ผลผลิตเยื่อสูงถึงร้อยละ 85 ขึ้นไป ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ไม่ยุ่งยากและให้ปริมาณผลผลิตเยื่อสูง ตัวอย่างชนิดการผลิตเยื่อเชิงกลได้แก่ stone groundwood pulping (SGW), refiner mechanical pulping (RMP), pressure ground wood (PGW), thermomechanical pulping (TMP) และ chemithermomechanical pulping (CTMP) เป็นต้น เส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงกลจะสั้นกว่าเยื่อเคมี โดยแต่ละเส้นไม่สามารถแยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้สมบูรณ์และยังคงมีลิกนินในปริมาณสูง โดยทั่วไปแล้วเยื่อเชิงกลใช้สำหรับผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์ ซึ่งต้องการความทึบแสงและความสามารถในการพิมพ์ ในขณะที่กระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานต่ำ รวมถึงมีข้อจำกัดทางด้านความแข็งแรง ความคงทนและการกลับสีของกระดาษ

2.1.4.2 **การผลิตเยื่อเคมี** (chemical pulping)

เป็นการใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินเพื่อให้ได้เส้นใยสำหรับใช้ในการผลิตกระดาษ ตัวอย่างของสารเคมีที่ใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น [6] การผลิตเยื่อด้วยวิธีนี้จะได้ผลผลิตเยื่อต่ำกว่าเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีเชิงกล โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 40-50 % ของน้ำหนักแห้งของวัตถุดิบก่อนต้มเยื่อ เยื่อเคมีจัดเป็นเยื่อที่มีการผลิตในลำดับสูงสุดของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเส้นใยที่ได้จากเยื่อเคมีสามารถแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ค่อนข้างสมบูรณ์ มีความแข็งแรงและมีพันธะของเส้นใยดีกว่าเยื่อเชิงกล การทำเยื่อเคมีโดยรวมมี 2 วิธีหลัก คือ

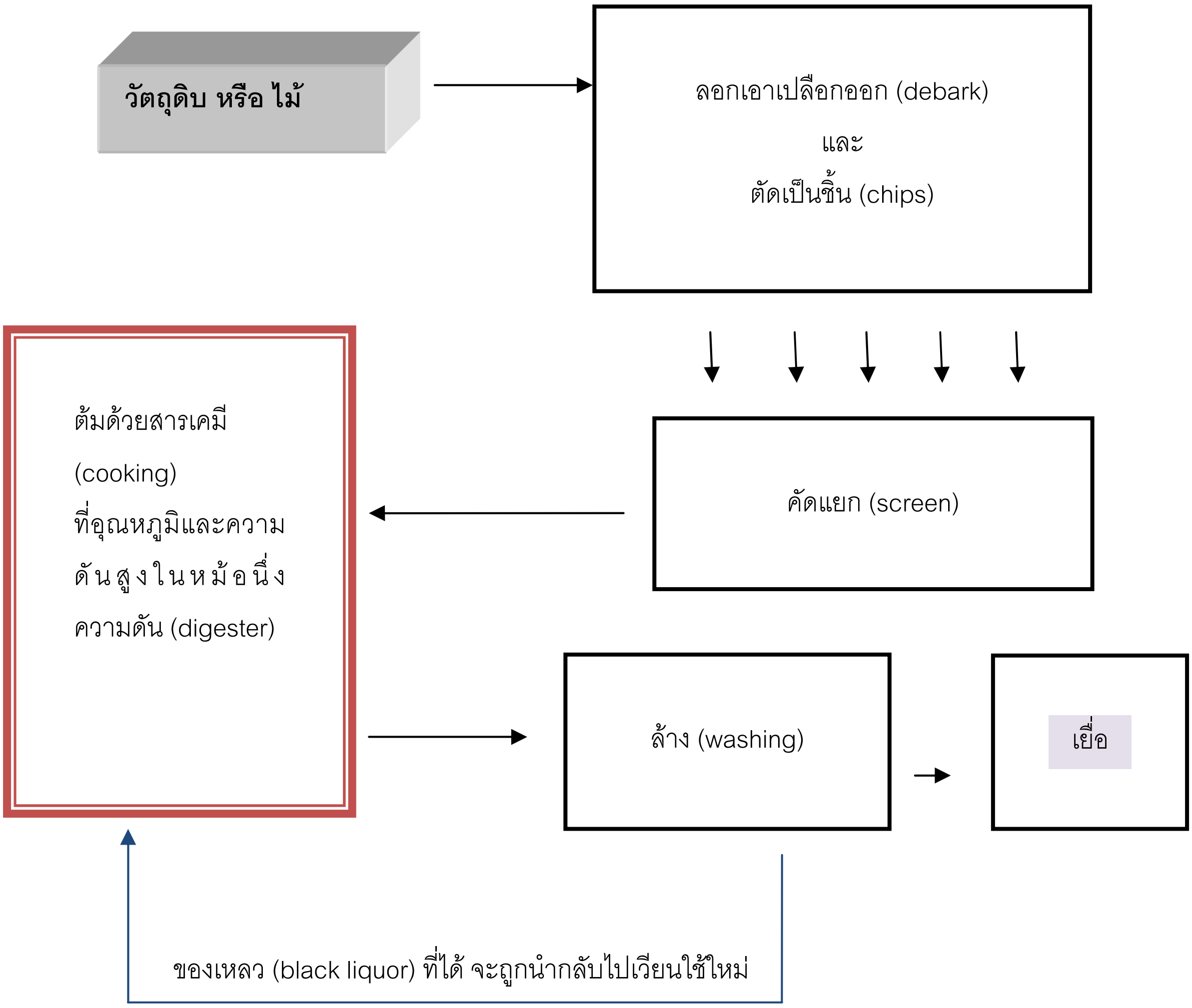
- alkaline process (kraft process) สารเคมีที่ใช้ในระบบได้แก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โดยกระบวนการคราฟต์พัฒนามาจากกระบวนการโซดา ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวในการต้มเยื่อ

: **การผลิตเยื่อแบบโซดา** (soda pulping)

การผลิตเยื่อแบบโซดาถูกค้นพบใน ค.ศ.1854 โดยชาวอังกฤษซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีในการต้มเยื่อ ทั้งนี้การผลิตเยื่อแบบโซดามีข้อจำกัดจึงไม่นิยมใช้เป็นกระบวนการหลักในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อ โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพียงตัวเดียวจะทำให้เส้นใยถูกทำลายได้มากและเยื่อที่ได้มีสมบัติความแข็งแรงน้อยกว่า การต้มเยื่อด้วยกระบวนการคราฟต์ แต่วิธีนี้มีข้อดีคือเป็นวิธีที่ง่ายและเหมาะต่อการผลิตเยื่อจากวัตถุดิบ อย่างเช่น ฟางข้าวและไม้เนื้อแข็งบางชนิดหรือพืชที่มีปริมาณซิลิกาและเถ้า (ash) แทรกอยู่เป็นจำนวนมาก [23]

- acid process (sulfite process) สารเคมีที่ใช้ในระบบได้แก่ กรดซัลฟิวรัส (H_2SO_3) และ ไบซัลไฟต์ไอออน (HSO_3^-)

2.1.4.3 **ขั้นตอนการผลิตเยื่อเคมี**



ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตเยื่อเคมี

ในขณะต้มเยื่อสารเคมีจะแทรกซึมไปยังบริเวณที่มีลิกนินอัดแน่นอยู่มาก คือ บริเวณ middle lamella ซึ่งยึดเซลล์ไว้ด้วยกันในไม้ สารเคมีเคลื่อนตัวจากที่ว่างบริเวณ lumen ของเส้นใยไปยัง semiporous ของผนังเซลล์ ลิกนินและคาร์โบไฮเดรตถูกละลาย ลิกนินที่อยู่บริเวณ middle lamella ถูกละลายเป็นส่วนสุดท้าย อย่างไรก็ตามขณะผลิตเยื่อเคมีชิ้นไม้จะยังคงไว้ซึ่งโครงสร้างของไม้ แม้นลิกนินที่ประกอบอยู่ส่วนใหญ่จะหายไปครึ่งหนึ่งของน้ำหนักของแข็งรวม โครงสร้างจะเกิดการอ่อนตัว แต่แตกแยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยง่ายด้วยแรงกล ทั้งนี้จะเกิดในช่วงเวลาที่ปล่อยออกจากหม้อนึ่งความดัน (digester) โดยลมเป่าหรือสูบออก เยื่อที่ออกมา

2.1.5 กระบวนการผลิตกระดาษ (papermaking process)

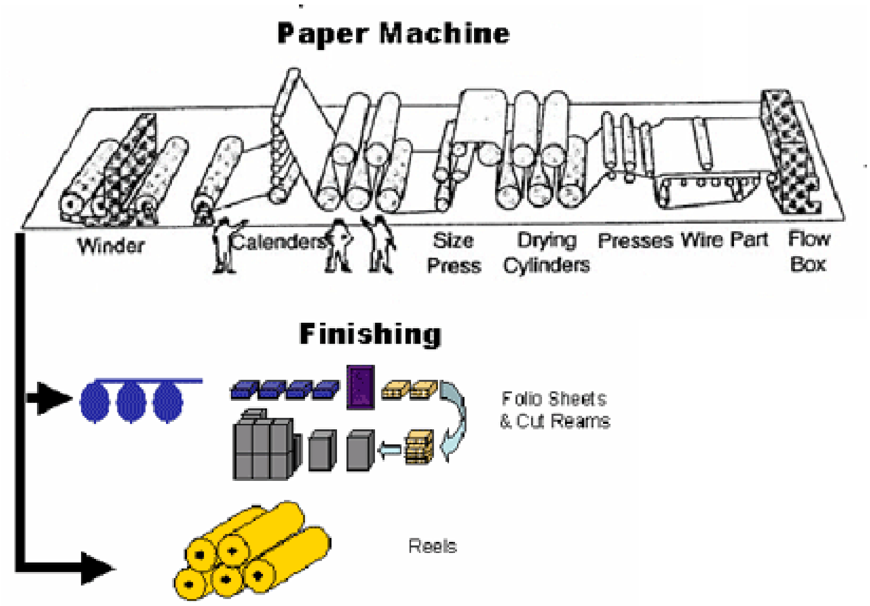
กระดาษ คือ วัสดุที่เป็นแผ่นใช้สำหรับในการเขียน การบรรจุภัณฑ์และเพื่อจุดประสงค์พิเศษอื่นๆ กระดาษประกอบไปด้วยเครือข่ายของเส้นใยซึ่งกระจายตัวในน้ำ (โดยทั่วไปได้มาจากไม้หรือเส้นใยจากพืชอื่นๆ) และเกิดการฟอร์มตัวของเส้นใยบนตะแกรง ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน กระดาษอาจประกอบด้วย สารเติมแต่ง (additives) และฟิลเลอร์ (filler) ด้วย [24]

2.1.5.1 การเตรียมน้ำเยื่อ (stock preparation)

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของกระบวนการผลิตกระดาษ ที่หน่วยนี้จะมีการปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยขั้นการเตรียมน้ำเยื่อประกอบด้วย การกระจายเยื่อ การปรับความเข้มข้น การตีเยื่อ (beating/refining) การผสมน้ำเยื่อกับสารเคมี การกำจัดสิ่งปลอมปน (contamination) และการกำจัดอากาศ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนลำดับขั้นตอนได้

2.1.5.2 การทำแผ่นกระดาษ (sheet forming)

การผลิตกระดาษเริ่มจากน้ำเยื่อจากส่วนของการเตรียมน้ำเยื่อไหลเข้าสู่ถังจ่ายน้ำเยื่อ (headbox) โดยถังจ่ายน้ำเยื่อมีหน้าที่ในการจ่ายน้ำเยื่อลงบนสายพานตะแกรงลวดอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้ากว้าง โดยน้ำเยื่อจะถูกแยกน้ำออก(dewatering) และเยื่อจะฟอร์มตัวเป็นแผ่นด้วยกระบวนการกรอง (sheet forming by filtration process) เมื่อแผ่นเปียกของกระดาษ ซึ่งมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 80 ออกจากส่วนของตะแกรงเดินแผ่นจะมีผ้าสักหลาด (felt) เป็นตัวพามายังส่วนกดรีดน้ำ (press section) กระดาษเมื่อออกจากส่วนนี้จะมีน้ำเหลืออยู่ร้อยละ 55-60 จากนั้นแผ่นกระดาษจะเข้าสู่ส่วนทำแห้ง (dryer section) แผ่นกระดาษจะวิ่งไปตามลูกอบ



ภาพที่ 2.8 กระบวนการผลิตกระดาษ [25]

2.1.6 สมบัติของกระดาษและการทดสอบ

การทดสอบคุณภาพกระดาษเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมคุณภาพกระดาษทั้งในโรงงานผู้ผลิตและผู้แปรรูปกระดาษเป็นผลิตภัณฑ์ โดยมีมาตรฐานในการทดสอบ ดังนี้

- ISO (International Standard Organization)
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry)
- SCAN (Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee)
- ASTM (America Society for Testing and Materials)

- มอก. (มาตรฐานอุตสาหกรรม) เป็นต้น

สมบัติกระดาษเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของกระดาษและยังสามารถใช้ในการแบ่งประเภทกระดาษตามลักษณะการใช้งานอีกด้วย สมบัติที่สำคัญของกระดาษได้แก่ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงแสงและสมบัติอื่นๆ ของกระดาษ เช่น สมบัติทางเคมี สมบัติการดูดซึมน้ำมันและผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีต่อกระดาษ

2.1.6.1 **สมบัติทางโครงสร้างของกระดาษ** (structural properties) บ่งบอกถึงลักษณะโดยรวมของแผ่นกระดาษ ได้แก่

- น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) คือ น้ำหนักของกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เก็บไว้ในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ได้ควบคุมตามมาตรฐานกำหนด หน่วยที่นิยมใช้เป็นกรัมต่อตารางเมตร

- ความหนา (thickness) คือ ระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของกระดาษภายใต้สภาวะทดสอบที่กำหนด หน่วยที่ใช้วัดเป็นไมโครเมตร แต่ส่วนใหญ่วัดเป็นมิลลิเมตร

- ความพรุน (porosity) คือ ช่องว่างภายในของเนื้อกระดาษที่อากาศสามารถไหลผ่านได้ หน่วยที่ใช้วัดเป็นวินาที หรือมิลลิลิตรต่อนาที

- ความเรียบ (smoothness) ขึ้นจะอยู่กับผิวของกระดาษ ส่วนความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ หน่วยที่ใช้วัดเป็นวินาที

- ทิศทางของเส้นใยและความแตกต่างของผิวกระดาษสองด้าน (two sideness) บอกถึงความแตกต่างของเนื้อกระดาษ ความแตกต่างของกระดาษในแนวทั้งสองและความแตกต่างของกระดาษระหว่างด้านทั้งสอง

2.1.6.2 **สมบัติเชิงกล** (mechanical properties) หมายถึง สมบัติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของกระดาษ สมบัติเชิงกลที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่

- ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) คือ ความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดที่กระดาษทนได้ก่อนจะขาดออกจากกัน มีหน่วยเป็นแรงต่อความกว้างของชิ้นทดสอบ เช่น กิโลนิวตันต่อเมตร หรือปอนด์ต่อนิ้ว

- ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) คือ ความสามารถของกระดาษที่ทนแรงดันได้สูงสุดเมื่อได้รับแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากต่อผิวหน้ากระดาษ มีหน่วยเป็นกิโลพาสคาล (kPa) หรือ กรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

- ความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (tear strength) คือ ความสามารถของกระดาษที่ต้านแรงซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบหนึ่งชิ้นขาดออกจากรอยฉีกนำเดิม หน่วยที่วัดได้เป็น มิลลินิวตันต่อกรัม

- ความทนต่อการหักพับ (folding endurance) คือ จำนวนที่กระดาษถูกพับไปมาจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกันภายใต้แรงที่กำหนด หน่วยที่ใช้เป็น จำนวนครั้ง หรือ $\log_{10}$

- ความแกร่งหรือความทรงรูป (stiffness) คือ ความสามารถของกระดาษที่ต้านทานแรงที่มากระทำให้กระดาษโค้งงอด้วยน้ำหนักกระดาษจากภายนอก หน่วยที่ใช้เป็น นิวตันเมตร หรือ นิวตัน

2.1.6.3 **สมบัติเชิงแสง** (optical properties) เมื่อแสงตกกระทบกระดาษสิ่งที่เกิดขึ้นคือ การสะท้อน กระเจิง การดูดกลืน ซึ่งปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านี้ของแสงที่มีต่อวัตถุและการตอบสนอง เช่น

- ความมันวาว (gloss) หมายถึง ลักษณะของผิวกระดาษที่สะท้อนแสง ณ มุมที่กำหนด โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ สำหรับกระดาษนิยมใช้เชิงมุม 75 องศากับเส้นปกติ

- ความขาวสว่างของกระดาษ (brightness) สำหรับในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ หมายถึง ค่าสะท้อนแสงสีน้ำเงินที่ช่วงคลื่น 457 นาโนเมตรเท่านั้น

- ความทึบแสง (opacity) สามารถวัดโดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงสีเขียวที่ช่วงคลื่น 557 นาโนเมตร ระหว่างกระดาษหนึ่งแผ่นที่รองหลังด้วยพื้นสีดำสนิทกับกระดาษที่วางซ้อนกันหนาจนแสงไม่ทะลุผ่าน

นอกจากนี้สมบัติเชิงแสงของกระดาษ ยังรวมถึง ความขาว (whiteness) และสี (color) ด้วย

2.1.7 เทคโนโลยีชีวภาพในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

คำว่า "ชีวภาพ" หรือ "bio" ในเทคโนโลยีชีวภาพย่อมหมายถึงสิ่งมีชีวิตทุกชนิดและทุกรูปแบบ นั่นคืออาณาจักรจุลินทรีย์ (microbiology) ที่เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สุด เซลล์และเนื้อเยื่อพืช เซลล์และเนื้อเยื่อสัตว์ หรืออวัยวะหรือส่วนประกอบของสิ่งมีชีวิต

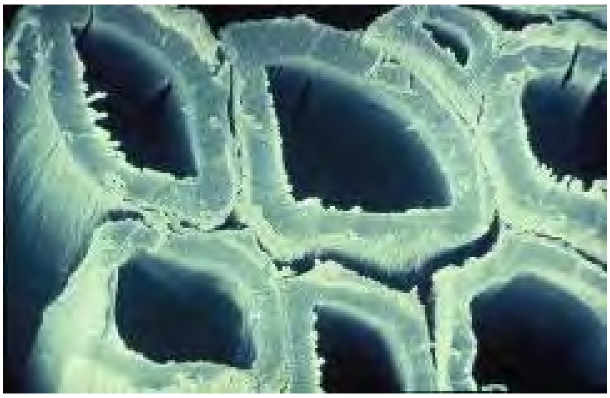
คำว่า "เทคโนโลยี" หรือ "technology" หมายถึงเทคนิคและกรรมวิธีของกระบวนการและขั้นตอนต่างๆ ในการทำให้สิ่งมีชีวิตเกิดกิจกรรมในการก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ผลผลิต ที่สามารถนำมาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ต่อเผ่าพันธุ์ของมนุษยชาติ สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ตลอดจนสภาพแวดล้อมและบรรยากาศของโลก [26]

สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีชีวภาพและมีการพัฒนามานานกว่า 20 ปี มีการพยายามศึกษาวิจัยการใช้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในการผลิตเยื่อ ฟอกเยื่อ ดัดแปลงเส้นใย และปรับปรุงชิ้นไม้ โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [27]

2.1.7.1 **การปรับสภาพเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพ** (biopretreatment)

การผลิตเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นการใช้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์จากจุลินทรีย์มาย่อยชิ้นไม้ก่อนเข้าสู่ขบวนการผลิตเยื่อตามปกติ ซึ่งสามารถช่วยลดพลังงาน ปริมาณการใช้สารเคมีและเวลาในการต้มเยื่อลงได้ อีกทั้งกระดาษที่ผลิตได้มีคุณภาพดีขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของลิกนินน้อยลงทำให้ง่ายต่อการฟอกขาว จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพส่วนใหญ่เป็นพวกเชื้อราเน่าขาว (white rot fungi) [28]

ในการผลิตเยื่อแบบเคมี สิ่งที่ได้คือการเอาลิกนินออกจากไม้หรือจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส อย่างไรก็ตามการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการทางเคมี ในการทำปฏิกิริยาไม่สามารถเลือกทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์และยังย่อยพวกพอลิแซกคาไรด์เป็นบริเวณกว้าง การปรับสภาพชิ้นไม้ด้วยเชื้อราจะทำให้เซลล์ของไม้อ่อนตัวและพองตัว (ภาพที่ 2.9) เชื้อราจะช่วยกำจัดลิกนินออกบ้างบางส่วนและช่วยเปลี่ยนแปลงรูปลิกนิน ด้วยเหตุนี้อาจเป็นผลทำให้ช่วยปรับปรุงการแทรกซึมของสารเคมีขณะที่ทำการผลิตเยื่อ ลดเวลา อุณหภูมิและความต้องการใช้สารเคมีในการต้มเยื่อ รวมถึงทำให้ลิกนินที่อยู่ในเยื่อ (kappa number) ลดลง ทำให้ง่ายต่อการฟอกขาวและลดปริมาณของเสียในน้ำทิ้ง เป็นต้น [29]

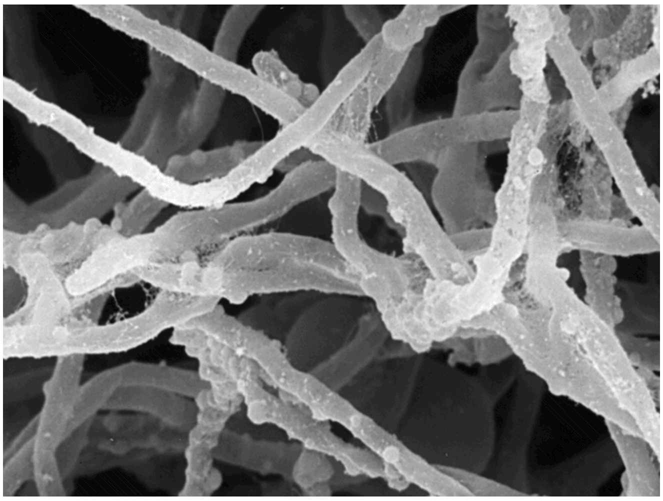


ภาพที่ 2.9 ลักษณะของกลุ่มเส้นใยหลังถูกปรับสภาพด้วยเชื้อรา [30]

2.1.8 **เชื้อราเน่าขาว** *Phanerocaete chrysosporium* (white rot fungi)

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นพวกเชื้อราเน่าขาว [28] ซึ่งผลิตเอนไซม์ย่อยสลายลิกนิน ส่วนใหญ่เป็นเชื้อราในกลุ่มแบซิดิโอมัยซีต (basidiomycete) ซึ่งสามารถย่อยสลายสับเสตรตจำพวกลิกนินเซลลูโลส (lignocellulosic substrate) ที่เป็นส่วนประกอบในเนื้อเยื่อไม้ โดยเชื้อราจะผลิตเอนไซม์ย่อยสลายลิกนิน (lignin modifying enzymes) ได้แก่ ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (LiP) แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (MnP) และแลกเคส (Lac) [31] โดยเชื้อราจะย่อยสลายส่วนที่เป็นลิกนินเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน [4] เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการสันดาป ในการย่อยสลายไม้ของเชื้อราเน่าขาวจากการทำลายในขั้นสุดท้ายพบว่าน้ำหนักของไม้อาจลดลงถึง 90% นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการฟอกสีโดยจะเห็นได้เป็นหย่อมๆ หรือลายเส้นสีขาวสลับกันกับเนื้อไม้ที่ยังดีอยู่ [32]

เชื้อรา *P.chrysosporium* ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เนื่องจากเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการฟอกเยื่อโดยไม่ใช้สารเคมี ซึ่งไม่เหมือนกับเชื้อราเน่าขาวตัวอื่นๆ ใน ligninolytic system ของ *P. chrysosporium* ไม่มี phenol oxidase เช่น laccase เข้ามามีส่วนร่วม โดย extracellular ligninolytic system ของ *P.chrysosporium* ประกอบไปด้วยเอนไซม์และ biochemical intermediates ที่น่าสนใจมากมาย เช่น lignin peroxidase (LiP), manganese peroxidases (MnP), cellobihydrolases, endoglucanase, β-glucosidases, glyoxal axidases, xylanases, xylosidases, pyranosee 2-oxidaese, superoxidaese dismutases และ mannose 6-phospatases [33] ลักษณะเส้นใยของเชื้อรา *P. chrysosporium* ดังแสดงในภาพที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเชื้อราจะเจริญเติบโตและ



ภาพที่ 2.10 เส้นใยของเชื้อรา *Phanerocaete chrysosporium* [34]

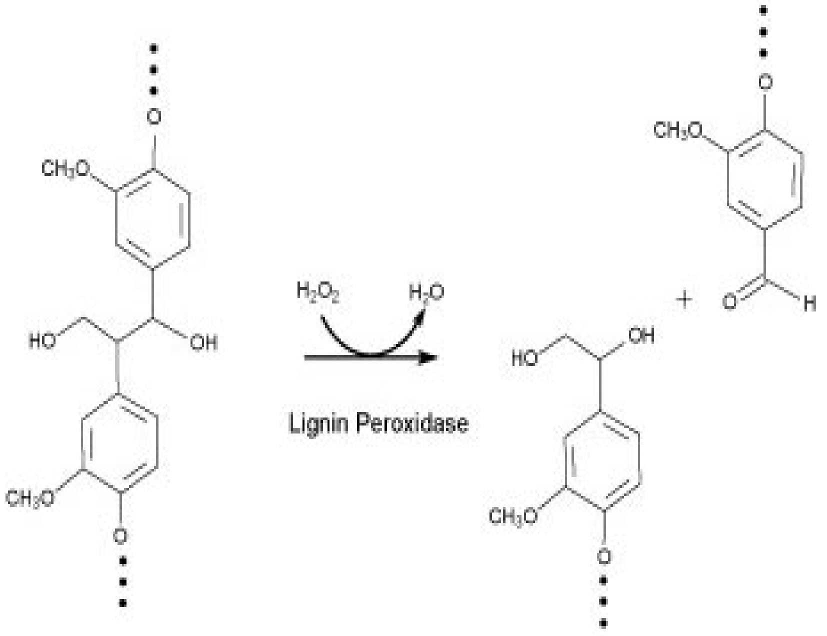
2.1.8.1 เอนไซม์ที่ย่อยสลายลิกนินที่ *P.chrysosporium* **ผลิตขึ้น (lignin degrading enzyme)**

เอนไซม์ย่อยสลายลิกนินที่ใช้มากในกระบวนการฟอกเยื่อ ได้แก่ lignin peroxidaese (LiP), manganaese peroxidaese (MnP) และ laccase ทั้ง 3 ตัวเป็นเอนไซม์ที่มีส่วนในการย่อยสลายลิกนินในทางชีวภาพ [28] โดยเป็นความสามารถของเชื้อราในการย่อยสลายหมู่ aromatic ring ที่อยู่ในองค์ประกอบ เช่น ลิกนิน

สำหรับเอนไซม์ที่ย่อยสลายลิกนิน ที่ *P.chrysosporium* สามารถผลิตขึ้นมีเพียง 2 ตัว คือ manganaese peroxidaese (MnP) และ lignin peroxidaese (LiP) แต่ไม่สามารถผลิต laccase ได้และเชื้อราเน่าขาวบางตัวเท่านั้นที่จะผลิต LiP โดยเชื้อราเองจะผลิตเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อช่วยในการส่งเสริมผลิตผลของการสันดาป โดยมีตัวร่วมปฏิกิริยา คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และ ตัวที่ 2 คือ veratryl alcohol (VA)

Manganaese peroxidaese (MnP): ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการเร่งการดึงอิเล็กตรอนของ Mn^{2+}ไปเป็น Mn^{3+}จากนั้นจะกลับไปดึงอิเล็กตรอน โดยเปลี่ยน

lignin peroxidaese (LiP) :ใช้ veratryl alcohol (VA) ซึ่งเป็นตัวผสานงานสำหรับการดึงออกซิเจนออกจากปฏิกิริยา โดย LiP จะดึงอิเล็กตรอนของ methyl groups บน aromatic ring และสามารถทำงานร่วมกับตัวทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการดึงออกซิเจน (ภาพที่ 2.11) [35]



ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาของ lignin peroxidaese [11]

2.1.8.2 **เอนไซม์ไซแลนเนส** (xylanase enzyme)

ไซแลนเนสเป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลาย polysaccharide beta linear-1,4-ไซแลนในไซโลส เอนไซม์ไซแลนเนสทำงานได้ดีที่ pH 8.0-9.5 อุณหภูมิสูงไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ย่อยสลายพันธะ 1,4-β-D-xylosidase ที่ยึดเหนี่ยวระหว่างแนวของไซแลนให้เป็นท่อนสั้นๆ ของไซแลน เรียก oligosaccharides จากนั้นก็มีเอนไซม์1,4-β-D-xylosidase ทำหน้าที่ย่อยสลายพันธะของ oligosaccharides ที่เป็นท่อนสั้นๆ ของไซแลนเหล่านี้ให้ย่อยลงไปจนในที่สุดเป็นน้ำตาลไซโลไบโอสหรือไซโลส [36] จึงสามารถทำลายเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช เอนไซม์มีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Scott และคณะ [39] ศึกษาการใช้วิธีทางชีวภาพปรับสภาพวัตถุดิบก่อนการผลิตเยื่อเชิงกล พบว่า การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพช่วยลดความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าขณะทำการบด ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ และช่วยลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

Bajpai และคณะ [40] ศึกษาการใช้วิธีทางชีวภาพปรับสภาพฟางข้าวสาลีก่อนการผลิตเยื่อเคมี พบว่า ช่วยลดปริมาณลิกนินและสารแทรก ลดปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (kappa number) ลดเวลาในการต้มเยื่อ ลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการต้ม ลดค่า COD ในน้ำทิ้ง เพิ่มค่าความขาวสว่างและค่าความขาวของกระดาษ

กิตติยา อติสงเคราะห์ และคณะ [41] ศึกษาการใช้วิธีทางชีวภาพปรับสภาพชิ้นไม้สับจากต้นกระถินเทพาก่อนการผลิตเยื่อเคมี พบว่า สามารถประหยัดเวลาในการต้มเยื่อลงได้ประมาณ 50% และเยื่อที่ได้มีคุณภาพดีใกล้เคียงกับกรรมวิธีการผลิตแบบปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในไม้กระถินเทพาอายุน้อย (3 ปี) ซึ่งสามารถให้เยื่อที่มีคุณภาพดีกว่าชิ้นไม้ที่ไม่มีการหมักด้วยเชื้อรา

Yang และคณะ [42] ศึกษาการใช้วิธีทางชีวภาพปรับสภาพยูคาลิปตัสก่อนการผลิตเยื่อแบบเชิงกลกึ่งเคมี (chemithermomechanical pulping, CTMP) พบว่าเชื้อราเน่าขาว (white rot fungi) T.h. 19-6 สามารถกำจัดลิกนินได้ 7.42 % และสารแทรก 11.52 % ภายในเวลา 5 วัน เพิ่มความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย 32% และเพิ่มค่าดัชนีความต้านแรงดึง (tensile index) ของแผ่นทดสอบและดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) 49% และ 34% ตามลำดับ

Mohiuddin และคณะ [43] ศึกษาการใช้วิธีทางชีวภาพปรับสภาพปอกระเจาและปอชวาก่อนการผลิตเยื่อเคมี พบว่าช่วยลดค่า kappa number ของเยื่อ 15% เมื่อต้มเยื่อโดยใช้วิธีการผลิตเยื่อแบบโซดาและแอนทราคิวโนน (soda-AQ pulping) และลดค่า kappa number ลง 9% เมื่อต้มเยื่อโดยใช้วิธีการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ (kraft pulping)

Leatham และคณะ [44] ศึกษาการใช้เชื้อราเน่าขาวปรับสภาพชิ้นไม้ของแอสแพนก่อนการผลิตเยื่อเชิงกลเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าความแข็งแรงทั่วไปเพิ่มขึ้นและสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ลดลง

Behrendt และคณะ [45] ศึกษาการปรับสภาพสนลอบลอลลี (loblolly pine) และสนแดง (red pine) พบว่าเมื่อใช้เชื้อรา *P.gigantea* ปรับสภาพท่อนไม้ เป็นเวลา 8 สัปดาห์ มีความแปรผันระหว่างการทดลองต่อซ้ำ 59%ขึ้นไป ช่วยลดพวกยางไม้และสารแทรกอื่นๆ ลดความต้องการใช้พลังงาน 9-27%และช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด และความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ได้จากการปรับสภาพสนแดงด้วยเชื้อรา 17, 20 และ 13% ตามลำดับ

Akhtar และคณะ [46] ศึกษาการกระตุ้นประสิทธิภาพของน้ำแช่ข้าวโพด ในขณะลดจำนวนของปริมาณเชื้อราที่ใช้ในการปรับสภาพสนลอบลอลลี และสนพีนัสทีด้า (pinus taeda) ด้วย *C.subvermispora* นาน 2 สัปดาห์ พบว่าเมื่อเพิ่มน้ำแช่ข้าวโพด (corn steep liquor) ในการปรับสภาพช่วยลดความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 19% และช่วยปรับปรุงความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด 28%

Kashino และคณะ [47] ศึกษาการปรับสภาพไม้เนื้อแข็ง (coase hardwood) ด้วยเชื้อราเน่าขาว IZU-154 เป็นเวลา 7, 10 และ 14 วันก่อนการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงกล พบว่า ลดความต้องการใช้พลังงานขณะทำการบดเยื่อและช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง

Bustamante และคณะ [48] ศึกษาการปรับสภาพชานอ้อยก่อนเข้าสู่การผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงกลด้วยเชื้อรา *C.subvermispora* ทำให้ชานอ้อยอ่อนตัวลง ส่งผลให้สมบัติด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและช่วยลดความต้องการการใช้พลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *P.ostreatus* และพบว่าการใช้เชื้อรา *P.chrysosporium* ในการปรับสภาพชานอ้อย ทำให้ปริมาณผลผลิตลดลงบางส่วนและค่าความขาวสว่างลดลง

Scott และคณะ [49] ศึกษาการผลิตเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพในระดับโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ในการปรับสภาพชิ้นไม้ 4 ตัน (น้ำหนักแห้ง) ประสบความสำเร็จ โดยเปรียบเทียบผลกับผลการทดลองในห้องทดลอง เยื่อเชิงกลที่ถูกปรับสภาพนาน 2 สัปดาห์

Morton และคณะ [50] ศึกษาการปรับสภาพสนแอสเพน สนนอร์เวย์ สนสปรูซ (norway spruce) ต้นไวท์เบิร์ซ (white birch) และต้นยูคาลิปตัส ด้วยเชื้อรา *C.subvermispora* และ *P.chrysosporium* พบว่าเชื้อราทั้งสองช่วยลดปริมาณความต้องการใช้พลังงานขณะทำการบดเยื่อด้วยจานบด เพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ ลดสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ ลดปริมาณลิกนิน เมื่อเพิ่มเวลาในการปรับสภาพ

Sabharwal และคณะ [51] ศึกษาการใช้วิธีทางชีวภาพปรับสภาพปอแก้วก่อนการผลิตเยื่อแบบเชิงกลกึ่งเคมี พบว่า ช่วยลดความต้องการในการใช้พลังงานในการบดลดลง เส้นใยแยกออกจากกันได้โดยง่าย สมบัติด้านความแข็งแรงสูงขึ้น ความทึบแสงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีผลทำให้ความขาวสว่างลดลง

Myers และ Kirk [52] ศึกษาการปรับสภาพสนลอบลอลลีด้วยเชื้อรา *C.subvermispora* นาน 4 สัปดาห์ ก่อนการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงกล พบว่า ปริมาณผลผลิตลดลง 4-7% ความต้องการการใช้พลังงานลดลง 21-31% ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด 47-60 % และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ 33-46% มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าความขาวสว่างและการกระเจิงแสงลดลง แต่ไม่มีผลต่อความทึบแสง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. ลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จากพื้นที่เพาะปลูกจังหวัดน่าน
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) เกรดอุตสาหกรรมจากบริษัท Merck KGaA, Germany
3. เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* จากคลังเชื้อหน่วยปฏิบัติการวิจัยการใช้ประโยชน์จากชีวมวลพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. กลูโคส (glucose)
5. มันฝรั่ง
6. ผงวุ้น (agar)
7. น้ำกลั่น
8. น้ำแช่ข้าวโพด (corn steep liquor)

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester); Universal Engineering Corporation, India
2. เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator); รุ่น T-292, Adirondack Machine Corporation, US
3. เครื่องบดเยื่อ (valley beater); รุ่น UEC-2018A, Universal Engineering Corporation, India
4. เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness tester); รุ่น LTDA, Regmed, Brazil

5. เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet former); รุ่น Rapid- Köthen Blattbildner, PTI Laboratory Equipment, Austria
6. ตู้ถ่ายเชื้อสำหรับเชื้ออันตราย (laminar 2 for biohazard); รุ่น BVT 123, “Issoco” Laminar flow
7. หม้อนึ่งความดันไอ (autoclave) ;Tai Chang Medical Instroment Factrory
8. เครื่องวัดความเรียบกระดาษ (BEKK smoothness and porosity tester); บริษัท The TMT Group
9. เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); Micro Meter, บริษัท Loretzen & Wettre
10. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst test); รุ่น 13-90 PAT, Auto-Bust Monitor/Burst-200
11. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile tester) ; รุ่น Strograph E-S, Toyoseiki Seisaku-SHO LTD., Japan
12. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (tear tester); รุ่น Protear, Thwing-Albert Instrument, USA
13. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (0.005-4,000 g); รุ่น TB-4002, Denver Instrument, Germany
14. เครื่องวัดความชื้น (moistrure determination balance); รุ่น KettFD-600, Kett Electric Laboratory, USA
15. เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (fiber quality analyzer, FQA); บริษัท OpTest Equipment Inc., Canada
16. ตู้อบ (oven); Venticell, Germany
17. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter); Denver Instrument, Germany

18. เครื่องวัดความขาวสว่างและความทึบแสง รุ่น Color Touch 2, ISO Technidyne corporation, USA
19. จานเพาะเชื้อ (petridish)
20. ขวดชมพู่ (flask) ขนาด 2,000 ,250 มิลลิลิตร
21. แท่งแก้วคนสาร
22. บีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 250, 500 มิลลิลิตร
23. เทอร์โมมิเตอร์
24. กระบอกตวง ขนาด 25, 100 และ 1000 มิลลิลิตร

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

- เตรียมลำต้นข้าวโพดเพื่อใช้ในการผลิตเยื่อ โดยเด็ดใบทิ้งหมดแล้วตากลำต้นข้าวโพดให้แห้ง เลือกลำต้นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จากนั้นตัดให้มีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร ผ่าครึ่งแล้วหั่นตามยาวให้เป็นชิ้นบางประมาณ 1 มิลลิเมตร (การเตรียมในที่นี้เป็นการเตรียมด้วยมือ มิได้ใช้เครื่องจักรกล ชิ้นที่ได้จึงมีขนาดที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลต่อการทดลองได้)

- ผลิตเชื้อราเน่าขาว (white rot fungi) โดยนำเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* จากคลังเชื้อที่เก็บไว้แยกเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar (PDA) นาน 7 วัน

3.2.2 การทดลองส่วนที่ 1: หาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด

การผลิตเยื่อ

- ผลิตเยื่อโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 และ 20 % ของน้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้ง โดยใช้ปริมาณลำต้นข้าวโพดแห้ง 150 กรัม ใช้อัตราส่วนน้ำหนัก

- ล้างเยื่อให้สะอาด จากนั้นนำเยื่อมาตีกระจายด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อเพื่อทำการแยกกระจายเส้นใย แล้วนำมาบดด้วยเครื่องตีเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T200 sp-10 จนกระทั่งได้ค่าสภาพระบายได้ (freeness) อยู่ที่ประมาณ 250-280 มิลลิลิตร

- นำเยื่อมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ เช่น ลักษณะของเยื่อตามมาตรฐาน ISO 160650 ปริมาณผลผลิตที่ได้ (yield) และปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อโดยวิธี kappa number ตามมาตรฐาน TAPPI T236 เป็นต้น

การขึ้นแผ่นกระดาษ

- นำเยื่อที่เหลือในแต่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการขึ้นแผ่นกระดาษด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร ตัวอย่างละ15 แผ่น

- ทดสอบสมบัติกระดาษ ซึ่งจะทดสอบ 10 ค่าต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ โดยนำกระดาษที่ได้จากการขึ้นแผ่นมาทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษ ได้แก่

: น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ตามมาตรฐาน ISO 536 ทดสอบโดยนำกระดาษที่เก็บไว้ในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นตามมาตรฐานกำหนด ชั่งน้ำหนัก อ่านค่า นำค่าที่อ่านได้หารด้วยพื้นที่ของกระดาษนั้น เพื่อหาน้ำหนักมาตรฐาน

: ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density หรือ density) ตามมาตรฐาน ISO 534 เป็นการวัดความหนาปรากฏของกระดาษ โดยวัดความหนาด้วยเครื่องทดสอบความหนา นำค่าที่อ่านได้นำไปหารน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

: ความเรียบ (smoothness) ตามมาตรฐาน ISO 5627 ทดสอบความเรียบของกระดาษ โดยเครื่องทดสอบความเรียบซึ่งเป็นการวัดเวลาที่อากาศไหลผ่านผิวของกระดาษ บันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่อง

: ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน ISO 1924 ทดสอบโดยนำกระดาษที่ได้รับการตัดแล้วได้ขนาดตามมาตรฐานทดสอบ ยึดไว้ระหว่าง

: ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ตามมาตรฐาน ISO 2758 ทดสอบโดยใส่ตัวอย่างทดสอบไปในเครื่องทดสอบ เมื่อเครื่องทดสอบเริ่มทำงาน แผ่นไดอะแฟรมจะถูกดันให้โปร่งขึ้นจนทำให้กระดาษแตกทะลุ ก่อนที่กระดาษจะแตกออออก กระดาษจะเกิดการยืดตัวออกไปในทุกทิศทาง นำค่าที่อ่านได้จากเครื่องไปหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

: ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (tear index) ตามมาตรฐาน ISO 1974 การทดสอบทำโดยใส่ชิ้นทดสอบขนาดตามมาตรฐานกำหนดในระหว่างปากจับบนแท่นและบนลูกตุ้มซึ่งเคลื่อนที่ได้ ใช้ใบมีดตัดชิ้นทดสอบเป็นการฉีกนำยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ทำการทดสอบโดยปล่อยให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่ ชิ้นทดสอบจะขาด อ่านค่าและนำมาคำนวนตามมาตรฐาน แล้วนำค่าที่ได้ไปหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

: ความขาวสว่าง (brightness) ตามมาตรฐาน ISO 2470 วัดค่าการสะท้อนแสงของแสงสีน้ำเงินที่ช่วงคลื่น 457 นาโนเมตร

: ความทึบแสง (opacity) ตามมาตรฐาน ISO 2471 วัดค่าการสะท้อนแสงสีเขียวที่ช่วงคลื่น 557 นาโนเมตร ระหว่างกระดาษหนึ่งแผ่นที่รองหลังด้วยพื้นสีดำสนิทกับกระดาษที่วางซ้อนกันหนาจนแสงไม่ทะลุผ่าน เป็นต้น

วิเคราะห์ผล

นำผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษมาวิเคราะห์ผลเพื่อหากระบวนการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพดที่เหมาะสม โดยมีการประมวลผลโดยใช้สถิติวิธี one-factor analysis of variance (one-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษนั้นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

3.2.3 การทดลองส่วนที่ 2: การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

การปรับสภาพด้วยเชื้อราเน่าขาว

- นำลำต้นข้าวโพดที่เตรียมไว้มาปรับสภาพด้วยเชื้อราเน่าขาว โดยดัดแปลงวิธีของ Sabharwal และคณะ [51]

- ลำต้นข้าวโพดที่ตัดเตรียมไว้ ใส่ลงในขวดรูปชมพูขนาด 2,000 มิลลิลิตร ปริมาณชิ้นของลำต้นข้าวโพด 50 กรัมของน้ำหนักแห้ง ปิกปากขวดด้วยพาราฟิน จากนั้นปิดทับด้วยกระดาษฟอยด์ นำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสนาน 20 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น เติมน้ำแช่ข้าวโพดความเข้มข้น 0.005 % ปรับความชื้นในขวดให้มีความชื้น 95% ปิดปากขวดด้วยพาราฟิน จากนั้นปิดทับด้วยกระดาษฟอยด์ นำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที

- นำเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่เลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA อายุ 7 วัน (ภาพที่ 3.1)ใส่ลงไปในลำต้นข้าวโพดที่เตรียมไว้แต่ละขวด จากนั้นปิดด้วยกระดาษฟอยด์ ใช้เชื้อราในปริมาณที่ต่างกัน โดยมีจำนวน 10 และ 20 ชิ้นวุ้นที่มีเชื้อราเน่าขาว (1 ชิ้นวุ้นที่มีเชื้อราเน่าขาวจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร) (ภาพที่ 3.2) และใช้เวลาในการปรับสภาพต่างกันคือ 5, 10, 20 และ 30 วัน ตามลำดับ

ภาพที่ 3.1 *Phanerocaete chrysosporium* อายุ 7 วัน

ภาพที่ 3.2 ภาพชิ้นของลำต้นข้าวโพดที่มีเชื้อ *P. chrysosporium* เจริญเติบโต

การผลิตเยื่อ

- นำชิ้นไม้จากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาผลิตเยื่อโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จากภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากข้อ 3.2.2

- นำเยื่อมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ เช่น ลักษณะของเยื่อ ตามมาตรฐาน ISO 160650 ปริมาณผลผลิตที่ได้ ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อโดยวิธี kappa number ตามมาตรฐาน TAPPI T236 เป็นต้น

การขึ้นแผ่นกระดาษ

- นำเยื่อที่เหลือในแต่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการขึ้นแผ่นกระดาษด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ โดยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร ตัวอย่างละ15 แผ่น

- ทดสอบสมบัติกระดาษ โดยนำกระดาษที่ได้จากการขึ้นแผ่นมาทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษ โดยทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองส่วนที่ 1

วิเคราะห์ผล

วิเคราะห์ผลเพื่อหาภาวะที่ดีของงานวิจัยนี้ในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยมีการประมวลผลทางสถิติวิธี two-factor analysis of variance ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษนั้นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

3.2.4 **นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการผลิตเยื่อด้วยลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้เชื้อราเน่าขาวกับการผลิตเยื่อด้วยลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา**

นำผลการทดสอบสมบัติต่างๆ จากการทดสอบเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกับเยื่อและกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมาวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยใช้สถิติวิธี one-factor analysis of variance (one-way ANOVA) ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษนั้นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการผลิตเยื่อกระดาษจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดในภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดโดยการผลิตเยื่อแบบโซดาในภาวะต่างๆ

สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ทดสอบ	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	40.00 ± 2.00	46.20 ± 2.69	48.76±0.38	50.44±0.07
ความยาวเส้นใย (mm)	1.55±0.03	1.50±0.08	1.36±0.02	1.34±0.01
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	26.95±0.37	31.54±0.57	36.11±0.41	34.00±1.07
ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)	0.00	0.00	1.15±0.07	0.70±0.14
ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ	25.45±0.45	24.17±0.28	22.41±0.29	20.94±0.21
ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)	0.74±0.04	0.68±0.01	0.65±0.01	0.74±0.02
ความทึบแสง (%)	80.83±2.20	86.03±0.04	83.13±0.13	81.54±0.33
ความขาวสว่าง (%)	22.01±0.86	25.22±1.08	31.64±0.13	32.93±0.31
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	89.45±0.23	87.01±1.56	93.76±0.73	89.10±0.61
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)	4.81±0.01	4.77±0.03	5.39±0.06	5.19±0.05
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)	4.00±0.02	5.69±0.26	6.43±0.01	6.05±0.06

ผลการทดลองในข้อ 4.1 นี้เป็นผลการทดลองส่วนที่ 1 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อที่ปริมาณ 15 และ 20 % ของน้ำหนักชิ้นลำต้นข้าวโพดแห้ง ต้มเยื่อเป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 ค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดโดยการผลิตเยื่อแบบโซดาในภาวะต่างๆ

สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ทดสอบ	**P-value ของปริมาณ NaOH ที่ใช้**	**P-value ของเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ**
ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	0.028853 *	0.006111 *
ความยาวเส้นใย (mm)	0.004636 *	0.316767
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	0.000249 *	0.059845
ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)	0.000078 *	0.015800 *
ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ	0.000150 *	0.003467 *
ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)	0.325078	0.325078
ความทึบแสง (%)	0.236930	0.083764
ความขาวสว่าง (%)	0.000067 *	0.011124 *
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	0.007933 *	0.005509 *
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)	0.000086 *	0.017260 *
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)	0.000126 *	0.002302 *

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพิจารณาจากค่า P-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 (หรือที่ความเชื่อมั่น 95%)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ปริมาณผลผลิตเยื่อสูงสุดเมื่อผลิตเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 % เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อน้อยกว่า 20% และเมื่อใช้เวลาในการต้มเยื่อน้อยเกินไป มีผลทำให้ชิ้นของลำต้นข้าวโพดหลังการต้มเยื่อไม่สุก เส้นใยแยกออกจากกันได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้มีปริมาณส่วนที่คัดทิ้งเป็นปริมาณมาก ปริมาณผลผลิตที่ได้จึงน้อยลง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าตัวแปรทั้งสองตัว คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีผลต่อปริมาณผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.2)

จากการทดลองยังพบว่าความยาวเส้นใยสูงสุดเมื่อผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 % เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.1) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้เวลาและปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นในการต้มเยื่อ มีผลทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีโอกาสเข้าไปทำลายเส้นใยได้มากขึ้น จึงทำให้ความยาวของเส้นใยลดลงตามลำดับ เมื่อใช้เวลาและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าเฉพาะปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เท่านั้นที่มีผลต่อความยาวของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.2)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้มีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากกว่าเวลาในการต้มเยื่อ เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 % ในการต้มเยื่อ เส้นใยของเยื่อที่ผลิตได้มีการแยกออกจากกันไม่สมบูรณ์ มีลักษณะเป็นกระจุกเส้นใยอยู่ เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 % มีผลทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปทำลายเส้นใยได้มากขึ้น โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำลายเส้นใยขนาดเล็กก่อน จึงทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง และจากผลวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าเฉพาะปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เท่านั้นที่มีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.2)

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (residual alkaline) สูงสุดเมื่อผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 % เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 % ในการต้มเยื่อนั้น พบว่าเยื่อที่ได้ไม่สามารถแยกออกจากกันได้สมบูรณ์เนื่องจากต้มเยื่อไม่สุก แม้นปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้จนหมด แสดงให้เห็นถึง

ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (kappa number) มีปริมาณต่ำสุดเมื่อผลิตเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 % เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ด่างที่ใช้ไปละลายลิกนินที่แทรกอยู่ในชิ้นของลำต้นข้าวโพดได้มากขึ้นตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.2)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏ ผลการทดสอบค่อนข้างมีความแปรปรวนสูง ทั้งนี้อาจเกิดมาจากความไม่สม่ำเสมอของสัดส่วนเส้นใยต่อน้ำในน้ำเยื่อขณะขึ้นแผ่นกระดาษ และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อไม่มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.2)

ในส่วนของความทึบแสงนั้นพบว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกับความหนาแน่นปรากฏ คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อความทึบแสง ผลการทดสอบค่อนข้างมีความแปรปรวนสูง (ตารางที่ 4.1) ทั้งนี้เป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าความหนาแน่นของกระดาษมีผลต่อความทึบแสงของกระดาษเช่นเดียวกัน เนื่องจากความหนาแน่นของกระดาษส่งผลต่อความสามารถในการกระเจิงแสงภายในแผ่นกระดาษนั้น และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อไม่มีผลต่อความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.2)

ความขาวสว่างมีค่าสูงสุดเมื่อผลิตเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 % เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มเวลาในการต้มเยื่อและเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อ ส่งผลให้ความขาวสว่างเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น จึงส่งผลให้กระดาษมีค่าความขาวสว่างมากขึ้น และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.2)

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดังปรากฏในตารางที่ 4.1 พบว่าความแข็งแรงทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น แม้นความยาวของเส้นใยลดลงและมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้นก็ตาม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าลิกนินถูกละลายออกมากขึ้น ทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เวลาในการต้มเยื่อนานขึ้นกลับพบว่าความแข็งแรงทั้งสองชนิดกลับลดลงเล็กน้อย แม้นการใช้เวลานานมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง ความยาวของเส้นใยลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งค่อนข้างไม่สอดคล้องกับที่คาดหวังไว้ นอกจากนี้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าสูงสุดเมื่อผลิตเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 % เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องมาจากการผลิตเยื่อในภาวะนี้มีผลทำให้เยื่อมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากที่สุด ประกอบกับเส้นใยมีปริมาณลิกนินค่อนข้างน้อย จึงมีผลทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างเส้นใยได้ดี ส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้นด้วย จึงทำให้สมบัติดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงสูงสุด เพราะสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงระหว่างพันธะเป็นหลัก อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.2)

ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมีทิศทางไปในทางเดียวกับดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (ตารางที่ 4.1) กล่าวคือเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น แม้นความยาวของเส้นใยลดลงและมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้นก็ตาม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าลิกนินถูกละลายออกมากขึ้น ทำให้

จากการพิจารณาสมบัติของเยื่อและกระดาษในภาพรวมทั้งหมด พบว่าภาวะการต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าความแข็งแรงของกระดาษสูงสุด แม้นให้ค่าความขาวสว่างต่ำกว่าและปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อสูงกว่าการใช้เวลาในการต้มเยื่อ 2 ชั่วโมง เพียงเล็กน้อย

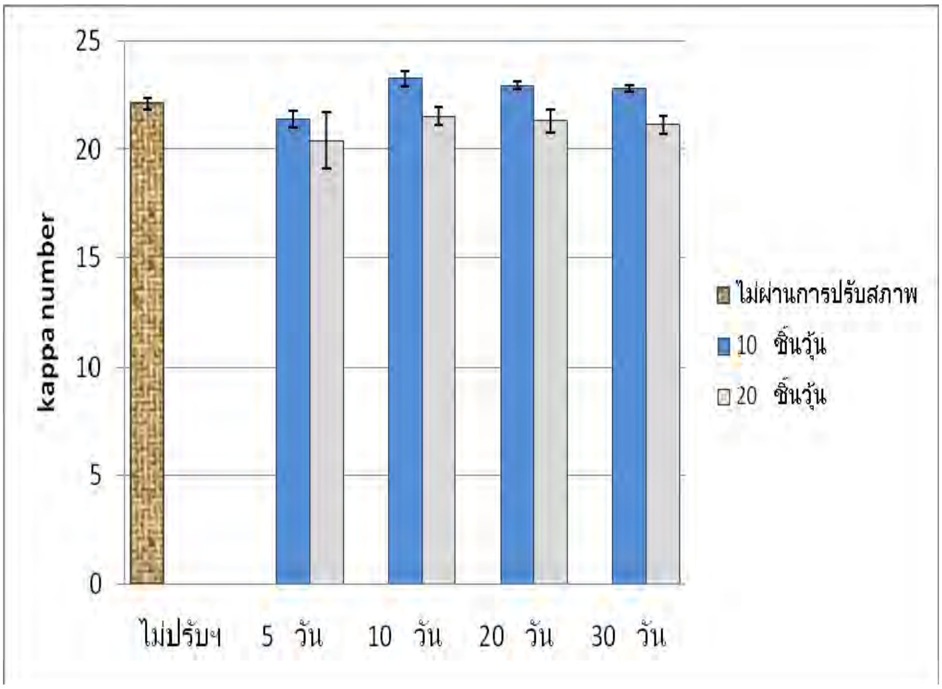
4.2 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาว *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

ผลการทดลองในข้อ 4.2 นี้เป็นผลการทดลองส่วนที่ 2 การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาว *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยทำการปรับสภาพด้วยเชื้อราในปริมาณ 10 และ 20 ชิ้นวุ้น และใช้เวลาในการปรับสภาพ 5, 10, 20 และ 30 วัน ตามลำดับ และหาภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา จากนั้นนำผลที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรามาเปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา การอภิปรายผลในตอนนี้จะเริ่มจากการอภิปรายถึงผลของปริมาณเชื้อราที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพด้วยเชื้อราต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยรวมเพื่อหาภาวะการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อที่ดีที่สุด ก่อนที่จะอภิปรายผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยเชื้อรากับการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

4.2.1 **ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ** (kappa number)

ตารางที่ 4.3 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ**				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	21.38±0.36	23.25±0.35	22.94±0.18	22.73±0.16	22.11±0.26
20	20.39±1.30	21.53±0.43	21.30±0.54	21.14±0.42	



ภาพที่ 4.1 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณของเชื้อรา พบว่า ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ปริมาณเชื้อราเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพชิ้นลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราทำให้เกิดการย่อยสลายลิกนินด้วยเอนไซม์ที่เชื้อราผลิตขึ้น นอกจากนี้เชื้อรายังอาจช่วยเปลี่ยนแปลงรูปของลิกนินให้ง่ายต่อการกำจัด [29] ด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อแบบโซดา เมื่อใช้เชื้อราในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาของเอนไซม์เพิ่มตามปริมาณเชื้อรา ผลที่ได้ คือ ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง

อย่างไรก็ตาม พบว่าเวลาในการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการปรับสภาพด้วยเชื้อรากลับพบว่าปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าการใช้เวลาในการปรับสภาพเพียง 5 วัน ส่งผลให้ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อมีค่าต่ำสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพชิ้นไม้ด้วยเชื้อราทำให้เกิดการย่อยสลายลิกนินด้วยเอนไซม์ที่เชื้อราผลิตขึ้น นอกจากนี้เชื้อรายังอาจช่วยเปลี่ยนแปลงรูปของลิกนินให้ง่ายต่อการกำจัด [29] ด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อแบบโซดา อย่างไรก็ตาม การทิ้งให้เชื้อราทำปฏิกิริยากับชิ้นไม้เป็นเวลานาน เชื้อราอาจมีโอกาสไปทำปฏิกิริยากับไซแลน ซึ่งเป็นส่วนเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อราที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถผลิตเอนไซม์ไซแลนเนสซึ่งไปย่อยสลายไซแลนได้ [33] ทำให้ปริมาณของไซแลนออกมาจากเส้นใยมากขึ้น ไซแลนที่หลุดออกมาอาจกลับมาเคลือบที่ผิวของเส้นใยมากขึ้น ส่งผลให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในระหว่างการต้มเยื่ออาจไปทำปฏิกิริยากับไซแลนที่ผิวของเส้นใยมากกว่าลิกนินที่อยู่ภายในเส้นใย ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อจึงมีค่ามากขึ้นและหลังจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 วัน ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อกลับเริ่มลดลง อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพที่นานขึ้นมีผลทำให้สารเคมีสามารถแทรกซึมเข้าไปทำลายไซแลนที่เคลือบอยู่และลิกนินที่แทรกอยู่ในเส้นใยได้มากขึ้น จึงมีผลทำให้ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อกลับลดลง จากการทดลองยังพบว่าปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อมีค่าต่ำสุด เมื่อใช้ปริมาณเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลาในการปรับสภาพ 5 วัน

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า ปริมาณเชื้อราที่ใช้และจำนวนวันที่ใช้ในการปรับสภาพด้วยเชื้อรามีผลต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ดังปรากฏในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	3.14E-08 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	5.71E-06 *

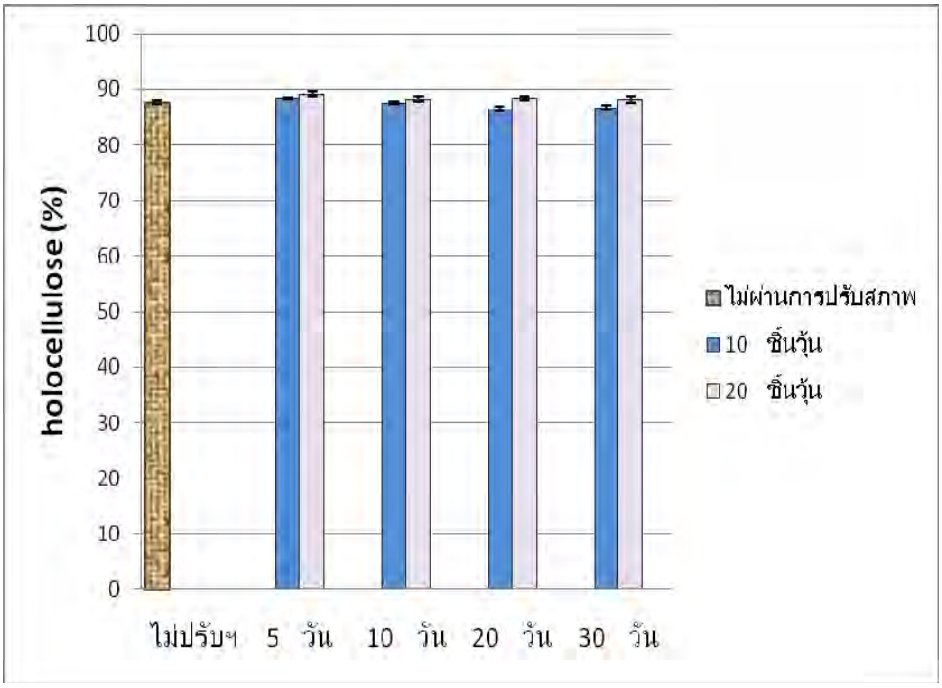
หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2.2 **ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย** (holocellulose)

ตารางที่ 4.5 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย** (%)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	88.41±0.10	87.62±0.21	86.50±0.51	86.71±0.41	87.70±0.27
20	89.16±0.52	88.25±0.49	88.39±0.25	88.17±0.63	

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ในส่วนของผลของปริมาณเชื้อราที่ใช้พบว่า ปริมาณเชื้อราที่เพิ่มจาก 10 ชิ้นวุ้นเป็น 20 ชิ้นวุ้น มีผลทำให้ปริมาณโฮโลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทางสถิติ (ค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.6) ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพด้วยเชื้อราในปริมาณ 20 ชิ้นวุ้น เกิดการย่อยสลายลิกนินด้วยเอนไซม์ย่อยสลายลิกนินทำให้ลิกนินละลายออกมาได้มากขึ้นและทำให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้น โดยปริมาณลิกนินในเส้นใยลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณโฮโลเซลลูโลส



ภาพที่ 4.2 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณโฮโลเซลลูโลส

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	4.26E-06 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	0.000132 *

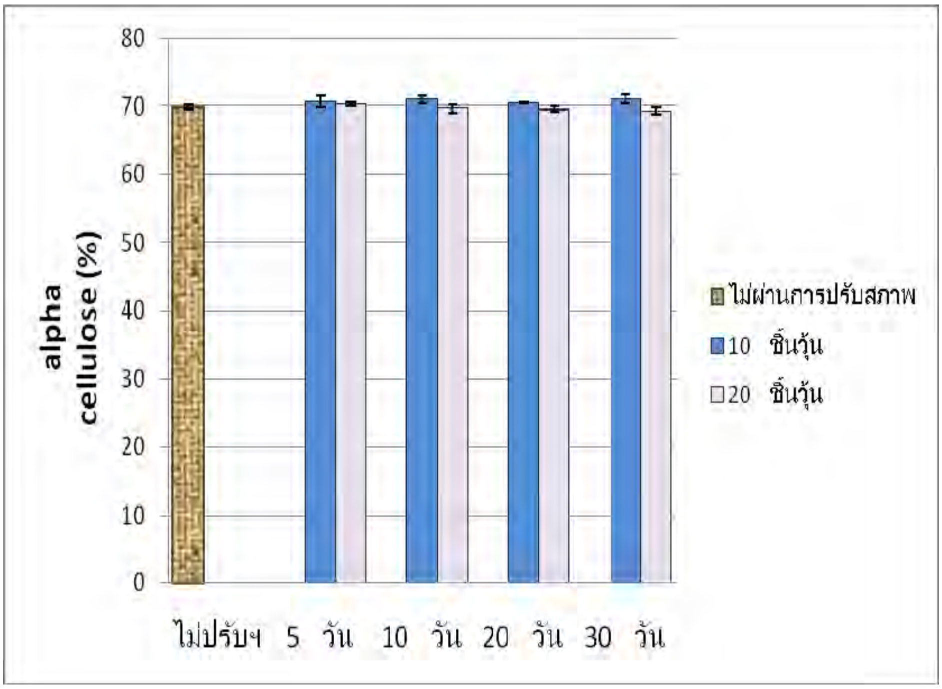
หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2.3 **ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย** (alpha cellulose)

ตารางที่ 4.7 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย (%)**				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	70.66±0.80	70.97±0.56	70.53±0.11	70.99±0.70	69.84±0.25
20	70.26±0.22	69.62±0.60	69.54±0.36	69.29±0.48	

หมายเหตุ : เปอร์เซนต์แอลฟาเซลลูโลสเทียบกับ 100 เปอร์เซนต์ โฮโลเซลลูโลส



ภาพที่ 4.3 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา*P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลส

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.000103 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	0.542266

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

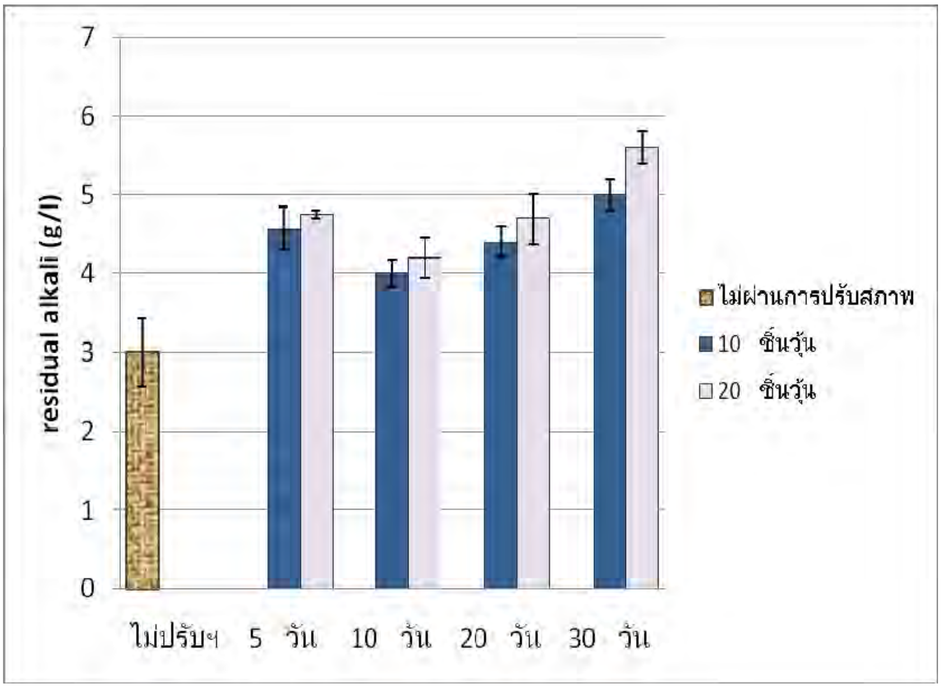
จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* พบว่า ปริมาณเชื้อราที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% (ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ตามที่ปรากฏในตารางที่ 4.8) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น สามารถย่อยสลายลิกนินในชิ้นของลำต้นข้าวโพดรวมถึงย่อยสลายไซแลนได้มากกว่าการปรับสภาพด้วยเชื้อ 10 ชิ้นวุ้น จึงส่งผลให้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีโอกาสเข้าไปทำลายเซลลูโลสในเส้นใยได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น พบว่าไม่มีผลต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ตามที่ปรากฏในตารางที่ 4.8)

4.2.4 **ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ** (residual alkali)

จากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการใช้เชื้อราในปริมาณที่มากขึ้นจาก 10 ชิ้นวุ้น เป็น 20 ชิ้นวุ้น ส่งผลต่อปริมาณด่างที่เหลือในน้ำต้มเยื่อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value ที่แสดงในตารางที่ 4.10 มีค่าน้อยกว่า 0.05 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเอนไซม์ย่อยสลายลิกนินที่เชื้อราผลิตขึ้นทำให้โครงสร้างของลิกนินเปลี่ยนไป สารต้มเยื่อสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ง่ายขึ้น [29] นอกจากนี้ เอนไซม์ไซแลนเนสที่เชื้อราผลิตขึ้นยังไปย่อยสลายไซแลน [33] ทั้งส่วนที่เป็นอิสระและส่วนที่อยู่ตรงบริเวณสารประกอบลิกนินคาร์โบไฮเดรต ส่งผลให้สารต้มเยื่อสามารถทำปฏิกิริยากับชิ้นไม้ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้มีปริมาณสารต้มเยื่อเหลืออยู่ในน้ำต้มเยื่อมากขึ้น

ตารางที่ 4.9 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)**				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	4.57±0.27	4.00±0.17	4.40±0.20	5.00±0.20	3.00±0.43
20	4.75±0.05	4.20±0.25	4.70±0.32	5.60±0.21	



ภาพที่ 4.4 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.03737 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	2.47E-07 *

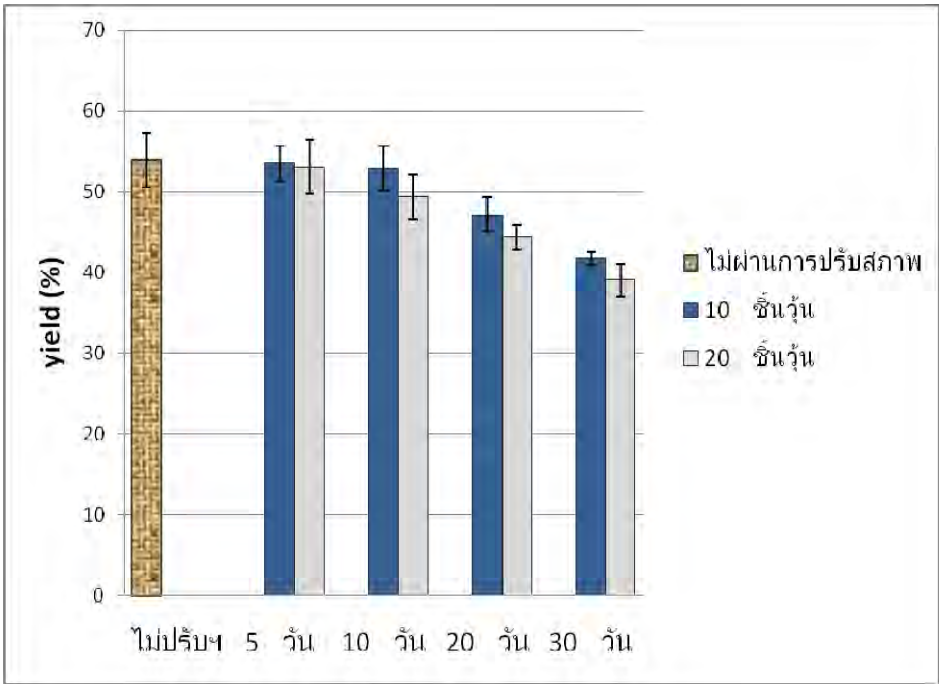
หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับผลของเวลาในการปรับสภาพด้วยเชื้อราที่มีต่อปริมาณด่างที่เหลืออยู่ในน้ำต้มเยื่อนั้น (ตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.4) พบว่า การใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้นมีแนวโน้มทำให้ปริมาณด่างที่เหลืออยู่ในน้ำต้มเยื่อเพิ่มขึ้น (ยกเว้นในกรณีใช้เวลาในการปรับสภาพ 10 วัน) ในขณะเดียวกันผลจากวิเคราะห์ทางสถิติชี้ให้เห็นว่าเวลาในการปรับสภาพด้วยเชื้อรามีผลต่อปริมาณด่างที่เหลืออยู่ในน้ำต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.10)

4.2.5 **ปริมาณผลผลิตเยื่อ** (pulp yield)

ตารางที่ 4.11 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)**				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	53.55±2.15	52.87±2.75	47.12±2.17	41.80±0.80	53.92±3.38
20	53.11±3.38	52.87±2.75	44.01±1.55	39.06±2.05	



ภาพที่ 4.5 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.228813
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	2.8E-05 *

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.11และภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* จำนวน 10 ชิ้นวุ้น เป็นระยะเวลา 5 วัน ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อสูงสุด และเมื่อใช้ปริมาณเชื้อราจำนวน 20 ชิ้นวุ้น ในการปรับสภาพเป็นระยะเวลา 30 วัน ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อต่ำสุด เมื่อวิเคราะห์ถึงผลของปริมาณเชื้อราที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ พบว่า

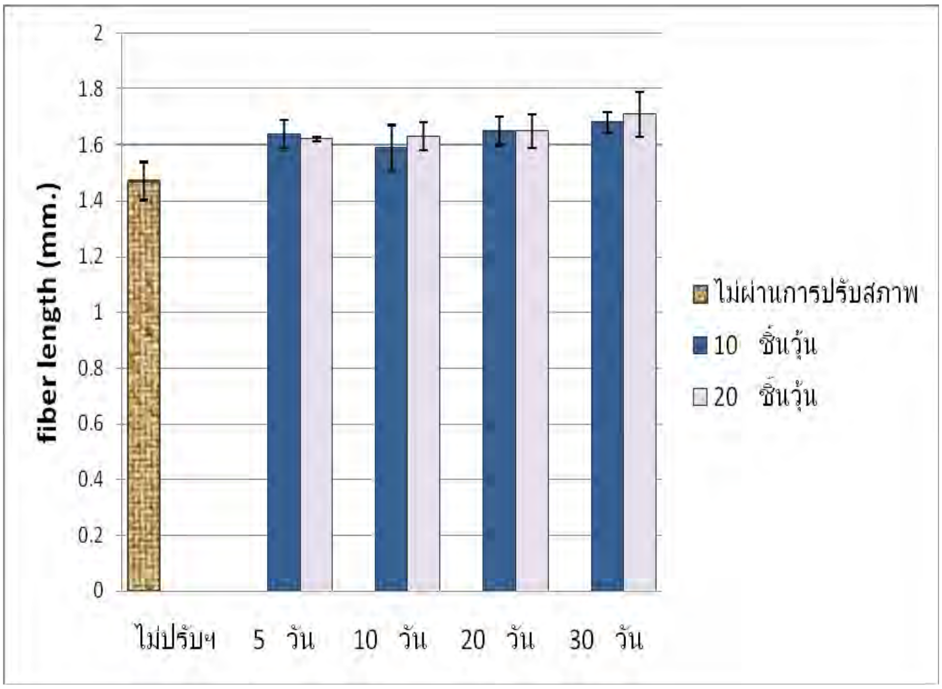
การเพิ่มเวลาในการปรับสภาพทำให้ปริมาณผลผลิตเยื่อลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อราที่ใช้ในการปรับสภาพทำให้เกิดการย่อยสลายสับเสตรตจำพวกลิกนินเซลลูโลส ด้วยเอนไซม์ที่เชื้อราผลิตขึ้นเองและในการปรับสภาพเชื้อรายังทำให้ลำต้นข้าวโพดอ่อนและพองตัว[29] โครงสร้างของลำต้นข้าวโพดเกาะกันแบบหลวมๆ ซึ่งทั้งหมดนี้มีผลทำให้การแทรกซึมของสารเคมีทำได้ง่ายขึ้น ฉะนั้นเมื่อทำการปรับสภาพด้วยเชื้อราในระยะเวลาที่นานขึ้น จึงทำให้เกิดการย่อยสลายสับเสตรตจำพวกลิกนินเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วในการย่อยสลายไม้ของเชื้อราเน่าขาวจากการทำลายในขั้นสุดท้ายพบว่าน้ำหนักของไม้อาจลดลงถึง 90% [32] เมื่อทำการต้มเยื่อนอกจากลิกนินจะถูกทำลายแล้วสารแทรกอื่นๆ ก็ถูกทำลายได้มากขึ้น เส้นใยที่แยกย่อยออกมาในระหว่างทำการปรับสภาพก็ถูกทำลายไปด้วย กอปรกับอาจเกิดการย่อยสลายไซแลนบริเวณลิกนินคาร์โบรไฮเดรตด้วยเอนไซม์ไซแลนเนสที่เชื้อราสร้างขึ้นเอง [33] จึงทำให้เฮมิเซลลูโลสรวมถึงเซลลูโลสก็อาจถูกทำลายด้วยสารที่ใช้ต้มเยื่อได้ง่ายขึ้น จนเป็นผลทำให้ปริมาณผลผลิตเยื่อลดลงได้ เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อราในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ถึงผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่มีต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ พบว่า เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพมีผลต่อปริมาณผลผลิตของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.12)

4.2.6 **ความยาวเส้นใย** (fiber length)

จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการใช้เวลาในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* เป็นระยะเวลา 30 วัน และใช้ปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพ 20 ชิ้นวุ้น ให้ความยาวเส้นใยของเยื่อมากที่สุด ปริมาณเชื้อราและเวลาในการปรับสภาพที่ใช้ไม่มีผลต่อความยาวเส้นใยของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.14)

ตารางที่ 4.13 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความยาวเส้นใยของเยื่อ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ความยาวเส้นใย** (mm.)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	1.64±0.05	1.59±0.08	1.65±0.05	1.68±0.04	1.47±0.07
20	1.62±0.01	1.63±0.05	1.65±0.06	1.71±0.08	



ภาพที่ 4.6 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความยาวเส้นใยของเยื่อ

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความยาวเส้นใย

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.733208
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	0.106306

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

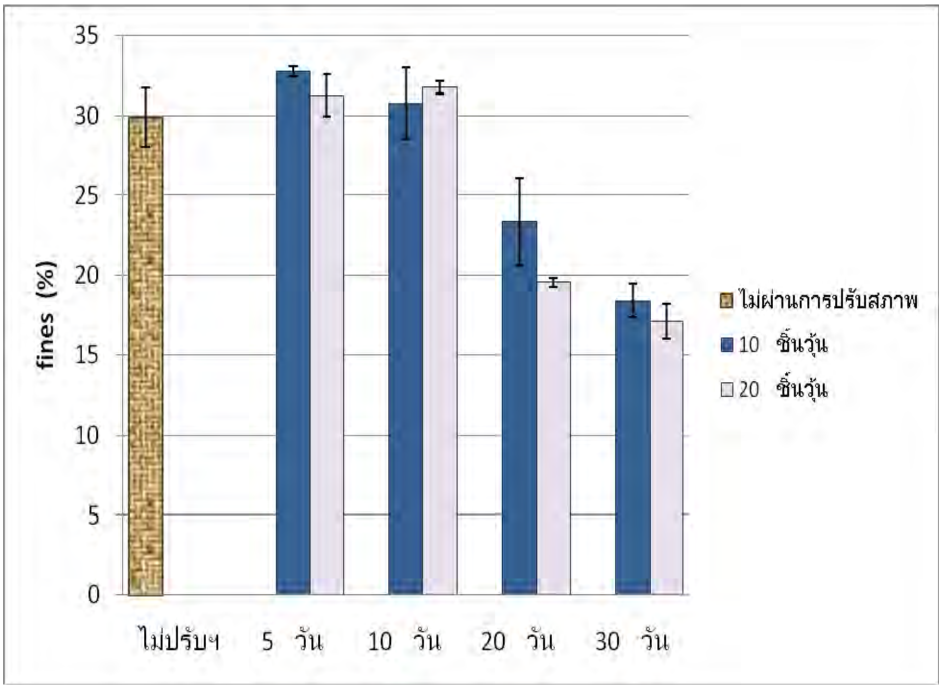
4.2.7 **ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก** (fines content)

ตารางที่ 4.15 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก** (%)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	32.71±0.33	30.74±2.23	23.34±2.70	18.42±1.07	29.89±1.84
20	31.26±1.30	31.73±0.41	19.57±0.29	17.10±1.11	

จากตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการใช้เวลาและปริมาณเชื้อราที่เพิ่มขึ้นในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* มีผลทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่อลดลง โดยการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เป็นระยะเวลา 5 วัน ให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่อสูงสุด ในขณะที่การปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น เป็นระยะเวลา 30 วัน ให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่อต่ำสุด การใช้เชื้อราในปริมาณที่มากขึ้นมีผลต่อการลดลงของปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ทั้งนี้อาจเนื่องจากในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการ

ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพก็ให้ผลไปในทางเดียวกับปริมาณเชื้อราที่ใช้ กล่าวคือ เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กถูกทำลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเชื้อรามีเวลาในการทำปฏิกิริยากับชิ้นลำต้นข้าวโพดนานขึ้น เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณเชื้อราและเวลาในการปรับสภาพมีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเนื่องจากมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.16)



ภาพที่ 4.7 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.029688 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	8.14E-12 *

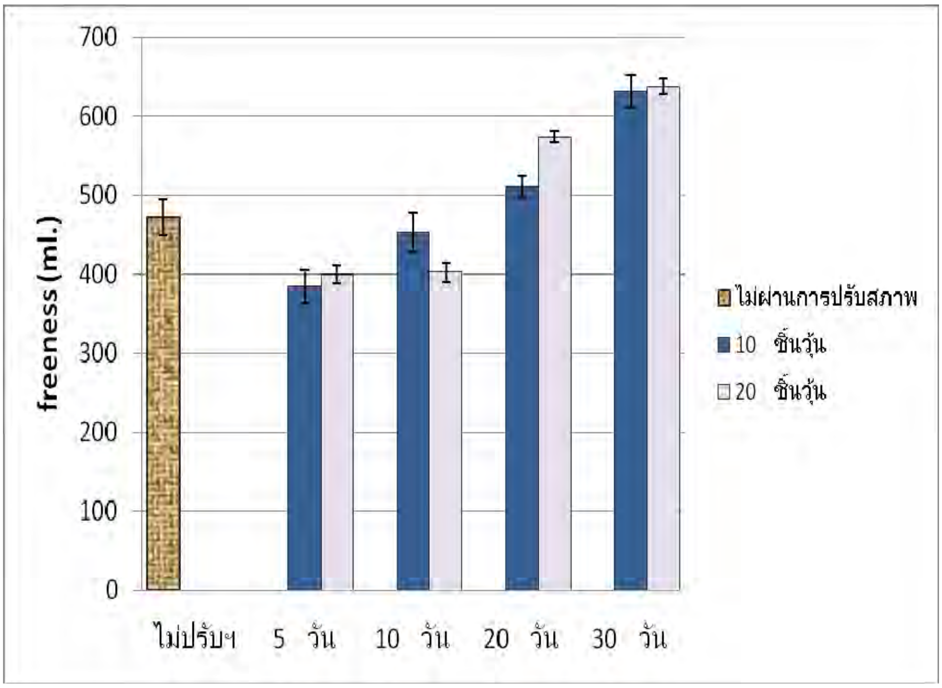
หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2.8 **สภาพระบายได้** (freeness)

ตารางที่ 4.17 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**สภาพระบายได้** (ml)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	384±21.57	453±25.36	511±13.87	632±20.50	472.00±22.37
20	400±11.68	402±12.66	574±6.66	637±9.71	

จากตารางที่ 4.17 และภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* มีแนวโน้มทำให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จากการนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปริมาณเชื้อราไม่มีผลต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า P-value มีค่าสูงกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.18)



ภาพที่ 4.8 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสภาพระบายได้

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.128296
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	7.2E-14*

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

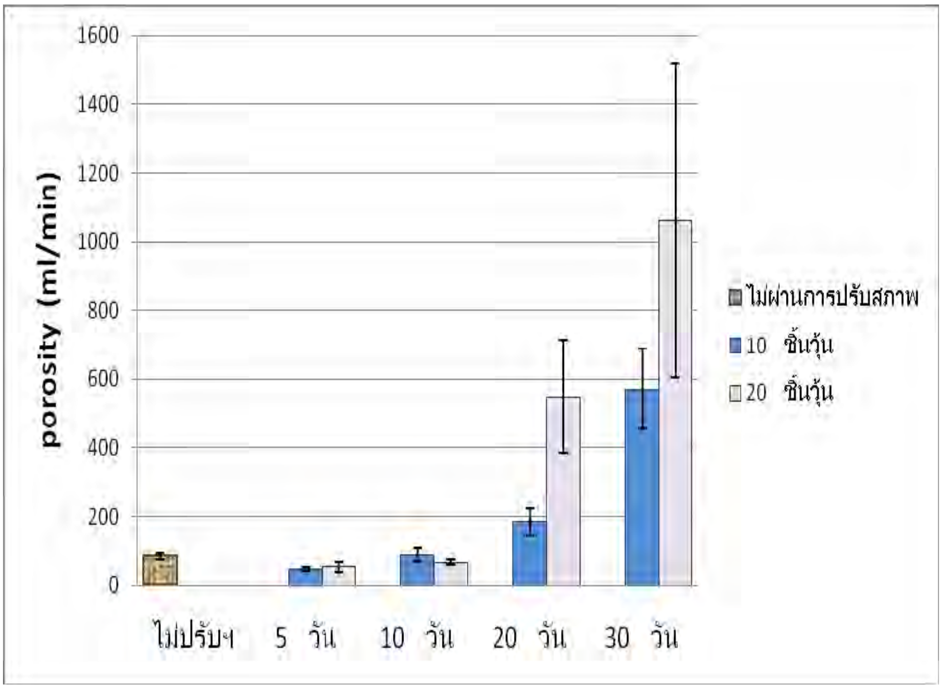
เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้นมีผลทำให้ของค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการปรับสภาพ มีผลทำให้เกิดการย่อยสลายไซแลนจากปฏิกิริยาของไซแลนเนสที่เชื้อราผลิตขึ้น [33] เฮมิเซลลูโลสถูกทำลายได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีความสามารถในการอุ้มน้ำและการพองตัวของเส้นใย เมื่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงส่งผลให้เส้นใยมีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง รวมถึงปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ลดลงด้วยที่

4.2.9 **ความพรุน** (porosity)

ตารางที่ 4.19 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความพรุนของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ความพรุน** (ml/min)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	50.00±5.51	90.30±20.53	184.80±38.96	571.60±116.32	87.00±8.00
20	56.80±14.00	69.70±7.86	549.80±163.63	1061.50±445.38	

จากตารางที่ 4.19 และภาพที่ 4.9 การปรับสภาพด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* จำนวน 20 ชิ้นวุ้น เป็นระยะเวลา 30 วัน ทำให้ความพรุนของกระดาษมีค่าสูงสุดและค่าความพรุนต่ำที่สุด เมื่อลำต้นข้าวโพดถูกปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น นาน 5 วัน จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับสภาพด้วยปริมาณเชื้อราและระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่าความพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.20 พบว่า การใช้เชื้อราปรับสภาพมีผลต่อค่าความพรุนของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% (ค่า P-value น้อยกว่า 0.05) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพในปริมาณที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่อลดลง เมื่อนำเยื่อมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษจึงทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยอยู่มาก อากาศก็เลยรอดผ่านกระดาษได้ดีกว่าการใช้เชื้อราจำนวนน้อยกว่าในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพด



ภาพที่ 4.9 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความพรุนของกระดาษ

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความพรุนของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.009061 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	2.77E-06 *

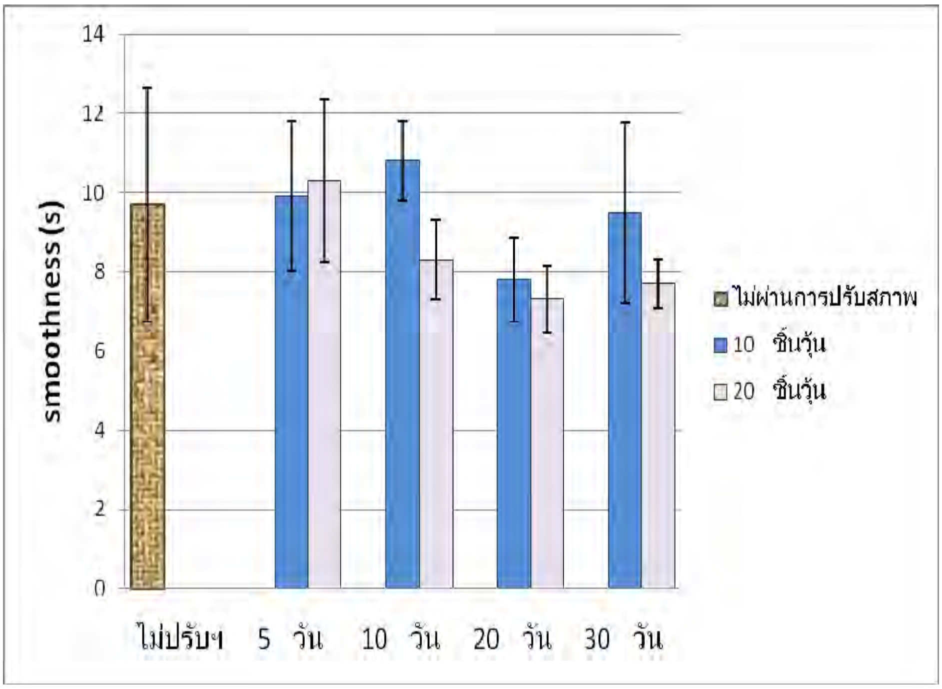
หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ระยะเวลามีผลต่อค่าความพรุนของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.20) ค่าความพรุนของกระดาษเพิ่มขึ้น เมื่อลำต้นข้าวโพดถูกปรับสภาพในระยะเวลานานขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ลดลง เมื่อใช้เวลานานขึ้นในการปรับสภาพ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยในเนื้อกระดาษมากขึ้น เมื่อนำเยื่อมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษจึงส่งผลให้ความพรุนของกระดาษเพิ่มขึ้น

4.2.10 **ความเรียบ** (smoothness)

ตารางที่ 4.21 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความเรียบของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ความเรียบ (s)**				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	9.90±1.90	10.80±1.01	7.80±1.06	9.50±2.29	9.70 ±2.95
20	10.30±2.05	8.30±1.00	7.30±0.85	7.70±0.61	



ภาพที่ 4.10 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความเรียบของกระดาษ

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความเรียบของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.090233
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	0.043386 *

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

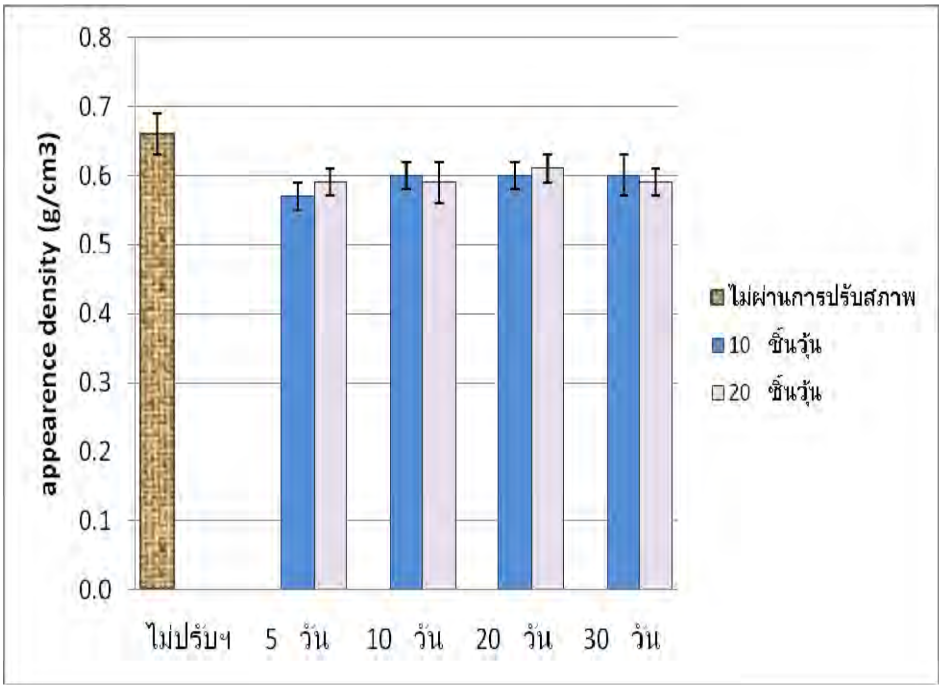
การวัดค่าความเรียบของกระดาษจะทำโดยการวัดเวลาที่อากาศไหลผ่านผิวของกระดาษ จากตารางที่ 4.21 และภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้ค่อนข้างมีความแปรปรวนสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการสุ่มวัดตัวอย่างยังไม่ทั่วถึง เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปริมาณเชื้อราไม่มีผลต่อค่าความเรียบของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าสูงกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.22) ในขณะที่เวลาในการปรับสภาพมีผลต่อค่าความเรียบของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.22) โดยค่าความเรียบของกระดาษมีแนวโน้มลดลง เมื่อลำต้นข้าวโพดถูกปรับสภาพในระยะเวลานานขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีปริมาณลดลง และเยื่อมีความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้น เมื่อนำเยื่อมาขึ้นแผ่นเส้นใยที่มีความยาวจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยได้มากกว่า กอปรกับไม่มีเส้นใยขนาดเล็กเข้ามาเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว อากาศจึงสามารถไหลผ่านผิวของกระดาษได้ดีขึ้น ทำให้ความเรียบของกระดาษลดลง

4.2.11 **ความหนาแน่นปรากฏ** (appearance density)

จากตารางที่ 4.23 และภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ปริมาณเชื้อราที่ใช้ในการปรับสภาพ รวมถึงใช้เวลาในการปรับสภาพไม่มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าปริมาณที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพไม่มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าสูงกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.24)

ตารางที่ 4.23 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความหนาแน่นปรากฎของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)				
	5 วัน	10 วัน	20 วัน	30 วัน	ไม่ผ่านการปรับสภาพ
10	0.57±0.02	0.60±0.02	0.60±0.02	0.60±0.03	0.66±0.03
20	0.59±0.02	0.59±0.03	0.61±0.02	0.59±0.02	



ภาพที่ 4.11 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความหนาแน่นปรากฎของกระดาษ

ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา*P. chrysosporium* ที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.669235
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	0.445847

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

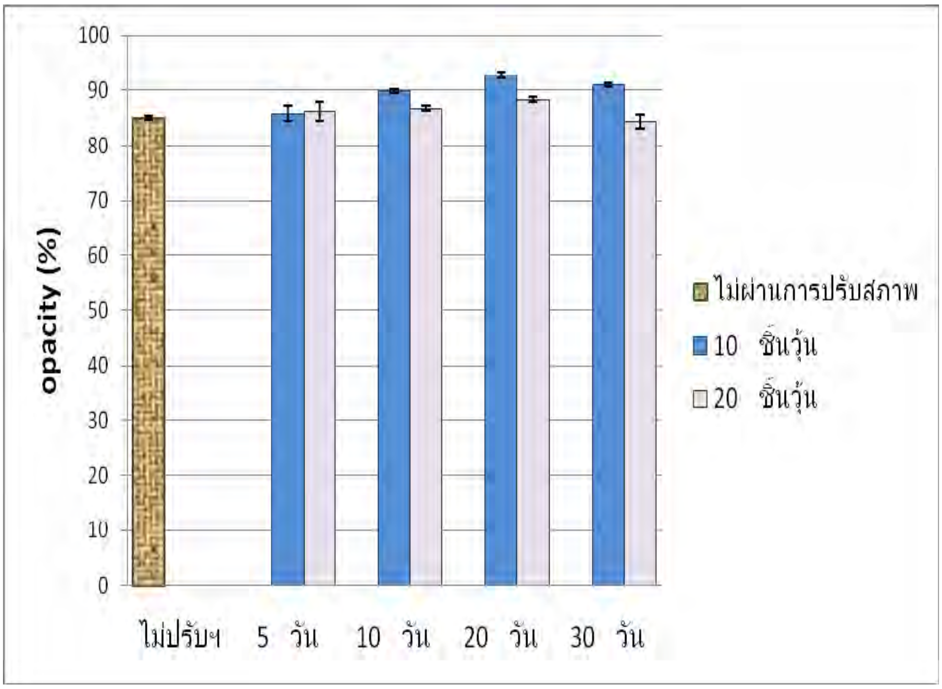
4.2.12 **ความทึบแสง** (opacity)

ตารางที่ 4.25 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ความทึบแสง (%)**				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	85.83±1.30	89.91±0.34	92.83±0.58	91.00±0.29	85.19±0.27
20	86.22±1.68	86.70±0.50	88.32±0.48	84.35±1.20	

จากตารางที่ 4.25 และภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* จำนวน 10 ชิ้นวุ้น เป็นระยะเวลา 20 วัน ทำให้ความทึบแสงของกระดาษมีค่าสูงสุด และลำต้นข้าวโพดถูกปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น นาน 30 วัน ให้ค่าความทึบแสงต่ำสุด การใช้เชื้อราในการปรับสภาพมีผลต่อค่าความทึบแสงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.26) โดยการใช้เชื้อราในปริมาณที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าความทึบแสงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งในการปรับสภาพลำต้น

ระยะเวลาในการปรับสภาพมีผลต่อค่าความทึบแสงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.26) โดยเมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น ค่าความทึบแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น (ตารางที่ 4.3) อย่างไรก็ตาม ค่าความทึบแสงค่อนข้างขึ้นอยู่กับความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ ซึ่งการขึ้นแผ่นกระดาษอาจมีผลต่อความหนาแน่นปรากฏด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากการขึ้นแผ่นกระดาษมีการควบคุมที่ไม่ดี อาจส่งผลต่อค่าความทึบแสงของกระดาษด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4.12 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษ

ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	8.86E-07 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	5.46E-07 *

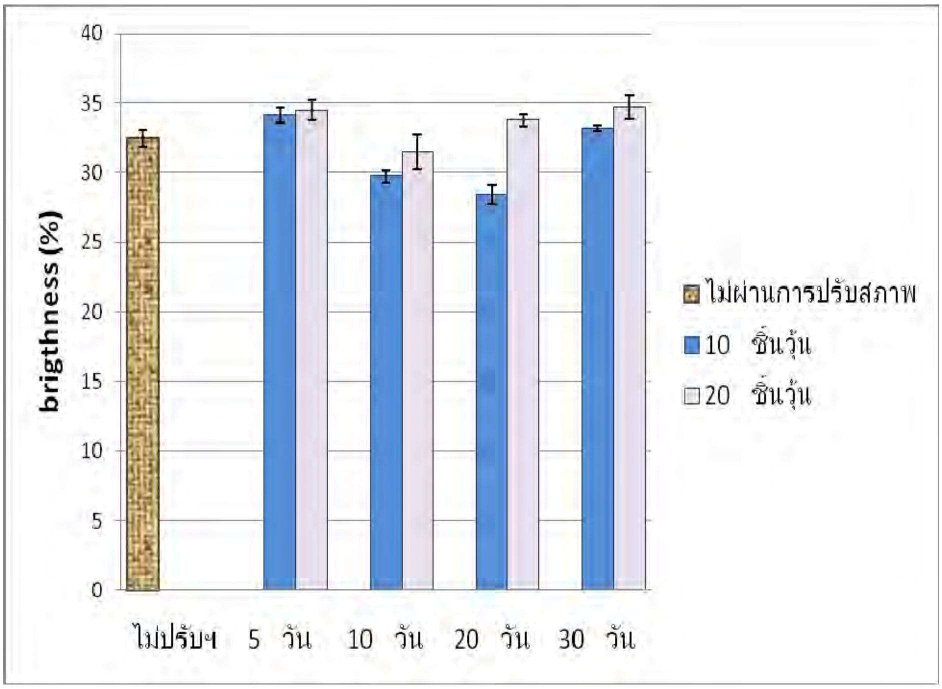
หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2.13 **ความขาวสว่าง** (brightness)

ตารางที่ 4.27 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ความขาวสว่าง** (%)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	34.16±0.58	29.75±0.44	28.44±0.69	33.22±0.22	32.47±0.61
20	34.48±0.72	31.47±1.22	33.77±0.45	34.70±0.85	

จากตารางที่ 4.27 และภาพที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าการใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดทำให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการปรับสภาพเพียง 5 วัน ให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษสูงสุด จากนั้นเมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้นค่าความขาวสว่างจะลดลง จากการทดลองเมื่อใช้เชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น ค่าความขาวสว่างจะกลับมาเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพ 30 วัน ส่วนการใช้เชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น ค่าความขาวสว่างจะกลับมาเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพ 20 วัน



ภาพที่ 4.13 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษ

ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	8.45E-06 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	1.28E-07 *

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การใช้เชื้อราในการปรับสภาพมีผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.28) โดยค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเชื้อรามากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อ เกิดการย่อยสลายสับเสตรตจำพวกลิกนินเซลลูโลส [31] ได้มากกว่า สารเคมีแทรกซึมได้ง่าย [29] กว่า จึงทำให้ลิกนินถูกละลายได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น เวลาในการปรับสภาพมีผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษอย่างมี

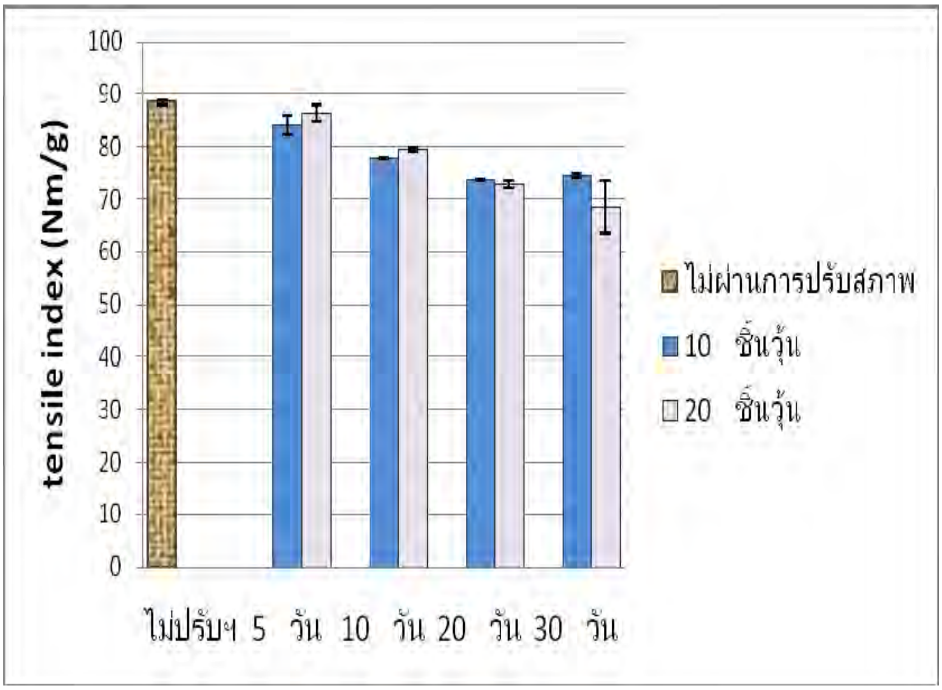
4.14 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile Index)

จากตารางที่ 4.29 และภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการใช้เชื้อราในการปรับสภาพเพียง 5 วัน ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าผลที่ได้ค่อนข้างมีความแปรปรวน ทั้งนี้อาจเกิดจากขนาดของชิ้นไม้ที่มีขนาดไม่ค่อยสม่ำเสมอ เมื่อนำมาทำการปรับสภาพและต้มเยื่อจึงมีผลต่อพื้นที่ในการย่อยสลายลิกนินของเอนไซม์และการแทรกซึมของสารเคมีในขณะทำการต้มเยื่อได้ จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า ปริมาณเชื้อราไม่มีผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% เนื่องจากค่า P-value มีค่าสูงกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.30)

อย่างไรก็ตาม เวลาในการปรับสภาพมีผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.30) โดยดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมีแนวโน้มลดลง เมื่อลำต้นข้าวโพดถูกปรับสภาพในระยะเวลานานขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในการปรับสภาพ ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้มีส่วนช่วยในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้วยเช่นกันเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก นอกจากนี้การใช้เวลาปรับสภาพชิ้นไม้ใช้นานขึ้น ทำให้การขจัดลิกนินออกได้น้อยลง ในขณะที่ปริมาณไซแลนถูกทำลายมากขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายไซแลนของไซแลนเนส ซึ่งอาจส่งผลให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยลดลงได้ด้วยเช่นกัน เมื่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตของเส้นใยน้อยลง ก็อาจส่งผลกระทบต่อพันธะระหว่างเส้นใย คือ การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยอาจเกิดขึ้นได้น้อย หรือทำให้ความแข็งแรงของพันธะลดลง ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง

ตารางที่ 4.29 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)**				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	84.00±1.84	77.74±0.24	73.72±0.19	74.52±0.47	88.42±0.33
20	86.29±1.58	79.45±0.42	72.99±0.73	68.54±5.10	



ภาพที่ 4.14 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

ตารางที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
- ปริมาณเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น	0.4232606
- เวลาที่ใช้ 5 10 20 และ 30 วัน	1.274E-08*
- ผ่านการปรับสภาพในภาวะที่ดีและไม่ผ่านการปรับสภาพ	0.014845*

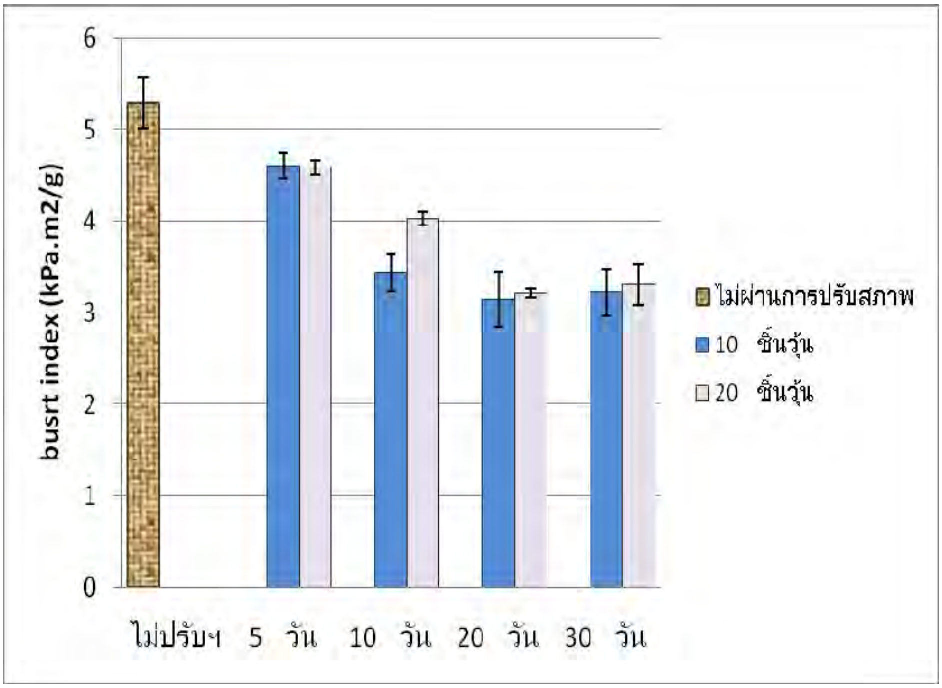
หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.15 **ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ** (burst Index)

ตารางที่ 4.31 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ** (kPa m^2/g)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	4.61±0.14	3.44±0.21	3.14±0.30	3.22±0.25	5.29±0.28
20	4.59±0.08	4.03±0.07	3.21±0.05	3.30±0.22	

จากตารางที่ 4.31 และภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษสูงสุดเมื่อลำต้นข้าวโพดผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อราเป็นระยะเวลา 5 วัน โดยดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเชื้อรามากขึ้น



ภาพที่ 4.15 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ

ตารางที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	0.036494 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	1.06E-09 *

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

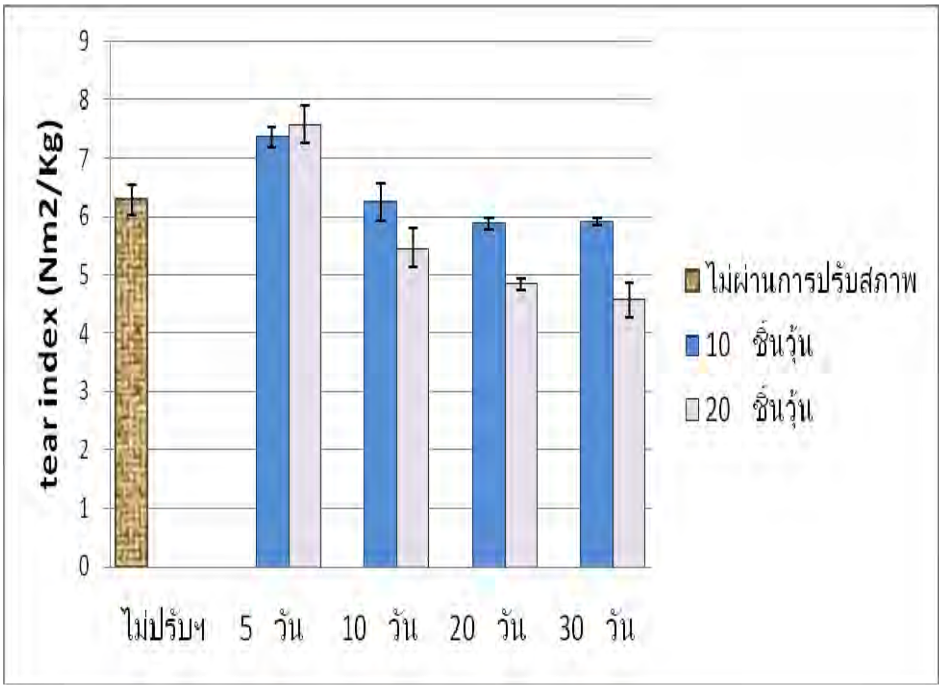
ปริมาณเชื้อรามีผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.32) โดยพบว่าเมื่อใช้ปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดเพิ่มขึ้น ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

เวลาในการปรับสภาพมีผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกันเนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.32) โดยเมื่อใช้เวลานานขึ้น ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ โดยหลักแล้วจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะ ซึ่งเมื่อลำต้นข้าวโพดถูกปรับสภาพด้วยเชื้อราเป็นเวลานาน ทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยอาจลดลงไปด้วย ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้มีส่วนช่วยในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้วยเช่นกันเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก รวมถึงการปรับสภาพชิ้นไม้ใช้เวลานานขึ้น ทำให้การขจัดลิกนินออกได้น้อยลง ในขณะที่ปริมาณไซแลนถูกทำลายมากขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายไซแลนของไซแลนเนส ซึ่งอาจส่งผลให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยลดลงและอาจส่งผลกระทบต่อพันธะระหว่างเส้นใย คือ การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยอาจเกิดขึ้นได้น้อย หรือทำให้ความแข็งแรงของพันธะลด ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจึงลดลง

4.16 **ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด** (tear Index)

ตารางที่ 4.33 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ

ปริมาณเชื้อรา (ชิ้นวุ้น)	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด** (Nm^2/Kg)				
	5 วัน	**10 วัน**	**20 วัน**	**30 วัน**	**ไม่ผ่านการปรับสภาพ**
10	7.36±0.16	6.25±0.33	5.88±0.10	5.91±0.06	6.29±0.26
20	7.58±0.32	5.46±0.33	4.84±0.11	4.57±0.30	



ภาพที่ 4.16 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ

ตารางที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ

ผลการเปรียบเทียบระหว่าง	P-value
ปริมาณเชื้อรา (10 และ 20 ชิ้นวุ้น)	9.76E-07 *
เวลาที่ใช้ (5, 10, 20 และ 30 วัน)	6.09E-11 *

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.33 และภาพที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดในกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรามีค่าสูงสุด เมื่อทำการปรับสภาพชิ้นไม้ด้วยเชื้อราปริมาณ 20 ชิ้นวุ้น เป็นระยะเวลา 5 วัน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณเชื้อราและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพมีผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.34) โดยเมื่อใช้ปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพเพิ่มขึ้นและใช้เวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อ

จากผลการทดลองในส่วนที่ 2 ทั้งหมด เมื่อพิจารณาดูอิทธิพลของปริมาณเชื้อราและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพแล้วจะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพค่อนข้างมีอิทธิพลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษเกือบทั้งหมด หากแต่อิทธิพลนั้นค่อนข้างไปในเชิงลบ จากการทดลองในข้างต้น พบว่าการใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาเป็นระยะเวลา 5 วัน ให้ค่าของสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษดีที่สุด การปรับสภาพเป็นเวลา 5 วัน โดยใช้ปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพ 20 ชิ้นวุ้น ให้ค่าปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อต่ำสุด หากแต่ให้ค่าความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด ปริมาณผลผลิตเยื่อ ปริมาณโฮโลเซลลูโลสและปริมาณด่างที่คงเหลืออยู่ในเยื่อสูงสุด และเมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพ 5 วัน โดยใช้ปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพ 10 ชิ้นวุ้น พบว่า ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กสูงสุด ดังนั้นการใช้เวลาในการปรับสภาพ 5 วัน เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* เนื่องจากใช้เวลาในการปรับสภาพน้อยและแนวโน้มของสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษโดยรวมแล้วดีกว่าการใช้เวลาในการปรับสภาพที่นานขึ้น และเมื่อพิจารณาดูอิทธิพลของปริมาณเชื้อราที่ใช้ในการปรับสภาพ (10 ชิ้นวุ้น เปรียบเทียบกับ 20 ชิ้นวุ้น) พบว่า ปริมาณเชื้อราที่แตกต่างกันส่งผลทำให้สมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษโดยมากแล้วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ด้วยเหตุนี้สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพชิ้นไม้จากลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คือใช้ปริมาณเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น และเวลาในการปรับสภาพ 5 วัน

4.3 เปรียบเทียบผลของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* กับการไม่ปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่การผลิตเยื่อแบบโซดา

ตารางที่ 4.35 สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เป็นเวลา 5 วัน เปรียบเทียบกับเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	ปรับสภาพ	ไม่ปรับสภาพ
ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (kappa number)	21.38±0.36	22.11±0.26
ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย (%)	88.41±0.10	87.70±0.27
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย (%)	70.66±0.80	69.84±0.25
ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)	4.57±0.27	3.00±0.43
ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	53.55±2.15	53.92±3.38
ความยาวเส้นใย (mm)	1.64±0.05	1.47±0.07
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	32.71±0.33	29.89±1.84
สภาพระบายได้ (ml)	384±21.57	472.00±22.37
ความพรุน (ml/min)	50.00±5.51	87.00±8.00
ความเรียบ (s)	9.90±1.90	9.70 ±2.95
ความหนาแน่นปรากฏ (mm)	0.57±0.02	0.57±0.02
ความทึบแสง (%)	85.83±1.30	85.19±0.27
ความขาวสว่าง (%)	34.16±0.58	32.47±0.61
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	84.00±1.84	88.42±0.33
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)	4.61±0.14	5.29±0.28
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)	7.36±0.16	6.29±0.26

ตารางที่ 4.36 ค่า P-value ของสมบัติของเยื่อและกระดาษเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เป็นเวลา 5 วัน กับการไม่ปรับสภาพ

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	P-value
ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (kappa number)	0.033797 *
ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย (%)	0.013285 *
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย (%)	0.229673
ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)	0.008672 *
ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	0.881541
ความยาวเส้นใย (mm)	0.042653 *
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	0.040180 *
สภาพระบายได้ (ml)	0.008016 *
ความพรุน (ml/min)	0.002743 *
ความเรียบ (s)	0.926090
ความหนาแน่นปรากฏ (mm)	0.011447 *
ความทึบแสง (%)	0.442315
ความขาวสว่าง (%)	0.130148
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	0.014845 *
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)	0.019369 *
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)	0.003866 *

หมายเหตุ: * สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.35 และ 4.36 จะเห็นได้ว่าเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยเวลา 5 วัน มีปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อที่ผลิตโดยไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อราอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อ เกิดการย่อยสลายสับเสตรตจำพวกลิกนิน

เยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วัน มีผลทำปริมาณด่างที่เหลืออยู่ในน้ำต้มเพิ่มขึ้นอย่างมีทางสถิติ เมื่อเทียบกับปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อที่ผลิตโดยไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา ทั้งนี้สามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกับกรณีของปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ ซึ่งปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ กล่าวคือ หากมีปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในชิ้นของลำต้นข้าวโพดอยู่มากจะมีผลทำให้มีความต้องการใช้สารเคมีในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นหรือทำให้ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อลดลง นั่นแสดงว่า การปรับสภาพชิ้นไม้ด้วยเชื้อราทำให้สามารถประหยัดสารเคมีได้มากขึ้น ในส่วนของปริมาณผลผลิตเยื่อนั้น พบว่าเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วัน ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

เยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วัน มีผลทำให้ความยาวเส้นใยของเยื่อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับความยาวเส้นใยของเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพก่อนการผลิตเยื่อ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าปริมาณลิกนินที่อยู่รอบๆ เส้นใยลดลง และการแทรกซึมของสารเคมีที่ง่ายขึ้น [29] มีผลต่อการเข้าไปละลายลิกนินและสารแทรกต่างๆ ที่อยู่รอบเส้นใยได้ดีขึ้น ทำให้กลุ่มของเส้นใยแยกออกจากกันเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้สมบูรณ์กว่าเส้นใยที่ได้จากเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เยื่อที่ได้จากการต้มจึงมีเส้นใยที่โค้งงอลดลง ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วัน มีผลทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่อเพิ่มขึ้นและค่าสภาพระบายได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่อที่ผลิตโดยไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต

เยื่อที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วัน ส่งผลให้ค่าความพรุนของกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความพรุนของกระดาษที่ผลิตโดยเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับภาพด้วยเชื้อรา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยภาวะนี้ เยื่อมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอยู่ในปริมาณมากกว่า เมื่อนำมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ เส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้จะเข้าไปเติมเต็มบริเวณช่องว่างระหว่างเส้นใย ทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยลดลง เมื่อนำมาทดสอบอากาศจึงไหลผ่านกระดาษได้น้อยกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา อย่างไรก็ตาม การปรับสภาพด้วยเชื้อราดูเหมือนจะมีผลทำให้ค่าความเรียบของกระดาษเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หากแต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติแล้วกลับพบว่าผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิตที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

เมื่อใช้เชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วันในการปรับสภาพ พบว่าค่าความหนาแน่นปรากฏของกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพด้วยเชื้อราทำให้ความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้น เส้นใยขนาดยาวมีโอกาสสานตัวและซ้อนทับกันมากกว่าเส้นใยขนาดสั้น จึงทำให้กระดาษที่ได้มีความฟ่ามเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อราในการปรับสภาพนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ปรับสภาพแล้ว พบว่า มีผลต่อสมบัติเชิงแสงของกระดาษ ได้แก่ ความทึบแสงและความขาวสว่าง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แม้นการปรับสภาพด้วยเชื้อราดูเสมือนจะทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก็ตาม

การใช้เชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วันในการปรับสภาพ พบว่าส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตโดยเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับภาพด้วยเชื้อราอย่างมี

การใช้เชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น โดยใช้เวลา 5 วันในการปรับสภาพ พบว่า ส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษที่ผลิตโดยเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับภาพด้วยเชื้อราอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในการปรับสภาพด้วยเชื้อรา มีผลทำให้ความยาวเส้นใยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลของความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ผลิตโดยไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด

ตารางที่ 5.1 สรุปภาวะที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ให้ผลดีที่สุดในการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	ภาวะที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ให้ผลดีที่สุด
ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 2 ชั่วโมง
ความยาวเส้นใย (mm)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% เวลา 1 ชั่วโมง
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 1 ชั่วโมง
ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 1 ชั่วโมง
ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 2 ชั่วโมง
ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)	สรุปไม่ได้
ความขาวสว่าง (%)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 2 ชั่วโมง
ความทึบแสง (%)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% เวลา 2 ชั่วโมง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 1 ชั่วโมง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 1 ชั่วโมง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% เวลา 1 ชั่วโมง

จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำผลการทดสอบมาพิจารณาโดยภาพรวมทั้งหมดเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด พบว่าภาวะการต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และใช้เวลาในการต้มเยื่อ 1

5.1.2 ผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาว*P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่าขาว *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	ผลการปรับสภาพด้วยเชื้อรา	
	ใช้ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้น	ใช้เวลาเพิ่มขึ้น
ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ	ลดลง	เพิ่มขึ้น และลดลงในวันที่ 30
ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย (%)	เพิ่มขึ้น	ลดลง
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย (%)	เพิ่มขึ้น	ไม่มีผล
ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)	เพิ่มขึ้น	ลดลง
ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	ไม่มีผล	ลดลง
ความยาวเส้นใย (mm.)	ไม่มีผล	ไม่มีผล
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	ลดลง	ลดลง
สภาพระบายได้ (ml)	ไม่มีผล	เพิ่มขึ้น
ความพรุน (ml/min)	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
ความเรียบ (s)	ไม่มีผล	ลดลง
ความหนาแน่นปรากฏ (mm.)	ไม่มีผล	ไม่มีผล
ความทึบแสง (%)	ลดลง	เพิ่มขึ้น และลดลงในวันที่ 30
ความขาวสว่าง (%)	เพิ่มขึ้น	ลดลง และเพิ่มขึ้นในวันที่ 20
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	ไม่มีผล	ลดลง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPam^2/g)	เพิ่มขึ้น	ลดลง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)	ลดลง	ลดลง

จากตารางที่ 5.2 การเพิ่มปริมาณเชื้อรา *P. chrysosporium* ในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดจาก 10 ชิ้นวุ้นเป็น 20 ชิ้นวุ้น มีผลทำให้สามารถลดความต้องการการใช้สารเคมีในการต้มเยื่อลงเนื่องจากปริมาณด่างที่คงเหลือในน้ำต้มเยื่อมีมากขึ้น เยื่อที่ผลิตได้มีปริมาณโฮโลเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความพรุน ความขาวสว่างและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษเพิ่มขึ้น หากแต่ปริมาณลิกนิน ค่าความทึบแสงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปริมาณเชื้อราเพิ่มขึ้นในการปรับสภาพไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเยื่อ ความยาวเส้นใย สภาพระบายได้ ความเรียบ ความหนาแน่นปรากฏ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น พบว่า ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อและความทึบแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและจะลดลงวันที่ 30 ของการปรับสภาพ ในขณะที่ค่าความขาวสว่างมีค่าลดลงและจะกลับเพิ่มขึ้นในวันที่ 20 อย่างไรก็ตาม การปรับสภาพด้วยเชื้อรานานขึ้นมีผลให้ปริมาณโฮโลเซลลูโลส ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ ปริมาณผลผลิต ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดลดลง หากแต่มีผลทำให้ค่าสภาพระบายได้และความพรุนเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อความยาวเส้นใยและความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ (ตารางที่ 5.2)

5.1.3 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

ผลจากการทดลองในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยเชื้อรานาน 5 วัน ให้สมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษดีเกือบทุกรายการทดสอบ และเมื่อพิจารณาดูอิทธิพลของปริมาณเชื้อราที่ใช้ในการปรับสภาพ (10 ชิ้นวุ้น เปรียบเทียบกับ 20 ชิ้นวุ้น) พบว่า ปริมาณเชื้อราที่แตกต่างกันส่งผลทำให้สมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษโดยมากแล้วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ในงานวิจัยนี้ คือใช้ปริมาณเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 5 วัน ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

5.1.4 เปรียบเทียบผลของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกับการผลิตเยื่อโดยไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

ตารางที่ 5.3 ผลของการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	ผลของการใช้เชื้อราในการปรับสภาพ
ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ	ลดลง
ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย (%)	เพิ่มขึ้น
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย (%)	ไม่แตกต่าง
ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)	เพิ่มขึ้น
ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)	ไม่แตกต่าง
ความยาวเส้นใย (mm.)	เพิ่มขึ้น
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	เพิ่มขึ้น
สภาพระบายได้ (ml)	ลดลง
ความพรุน (ml/min)	ลดลง
ความเรียบ (s)	ไม่แตกต่าง
ความหนาแน่นปรากฏ (mm)	ลดลง
ความทึบแสง (%)	ไม่แตกต่าง
ความขาวสว่าง (%)	ไม่แตกต่าง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	ลดลง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa m^2/g)	ลดลง
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)	เพิ่มขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา คือ การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น ใช้เวลาในปรับสภาพนาน 5 วัน จึงได้นำผลการทดลองที่ได้จากการปรับสภาพโดยใช้ภาวะดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากกรณีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ตารางที่ 5.2) ซึ่งพบว่า การปรับสภาพด้วยเชื้อราส่งผลให้ปริมาณโฮโลเซลลูโลส ความยาวเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ปริมาณด่างที่คงเหลือในน้ำต้มเยื่อ รวมถึงดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษเพิ่มขึ้น หากแต่ทำให้ค่าสภาพระบายได้ ปริมาณลิกนิน ความพรุนของกระดาษ ความหนาแน่นปรากฏ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษลดลง แต่ไม่มีผลต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณผลผลิตเยื่อ ความเรียบ ความสว่าง และความทึบแสงของกระดาษแต่อย่างใด

5.1.5 ความเป็นไปได้ในการนำกระดาษที่ผลิตได้ไปใช้งานจริง

จากตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่ากระดาษที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* จำนวน 10 ชิ้นวุ้น เป็นเวลา 5 วัน ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาในงานวิจัยนี้ เมื่อเทียบคุณลักษณะคร่าวๆ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม พบว่ากระดาษที่ผลิตได้มีคุณลักษณะที่สามารถนำไปใช้ผลิตกระดาษห่อของ กระดาษหนังสือพิมพ์ แต่เนื่องจากกระดาษที่ผลิตได้มีค่าความทึบแสงที่น้อยกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงอาจต้องทำการบดเยื่อเพื่อเพิ่มความทึบแสงให้ได้ตามมาตรฐานกระดาษหนังสือพิมพ์ นอกจากนี้กระดาษที่ผลิตได้ยังสามารถนำไปผลิตกระดาษพิมพ์และเขียน หากแต่ต้องมีการปรับปรุงเรื่องความขาวสว่าง ซึ่งทำได้โดยการนำเยื่อไปฟอกก่อนขึ้นแผ่นและควรต้องทดสอบการดูดซึมน้ำเพิ่มเติม สำหรับในใช้การผลิตกระดาษเขียน หรือสามารถนำไปใช้ร่วมกับเส้นใยจากต้นไม้ในการผลิตกระดาษอื่นๆ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมนั้น ควรต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ทั้งเรื่องระบบวิศวกรรม ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยี รวมถึงเทคนิคและวิธีในการปรับสภาพวัตถุดิบที่มีปริมาณมากขึ้นด้วยเชื้อรา

ตารางที่ 5.4 สมบัติของกระดาษที่ผลิตจากการปรับสภาพลำต้นข้าวโพดด้วยเชื้อราเน่า *P. chrysosporium* ในภาวะที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับสมบัติของกระดาษตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือพิมพ์และกระดาษเหนียว [53, 54, 55]

คุณลักษณะ	**หน่วย**	A	**เกณฑ์ที่กำหนด**			
			B	C	D	E
		น้ำหนักมาตรฐาน g/m^2				
		60	65	55.3	60	60
ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักมาตรฐาน ไม่เกิน	%	±0.4	±5	±5	±5	±5
ความต้านแรงฉีกขาด แนวขนานเครื่อง ไม่น้อยกว่า	mN	449	370	-	-	-
ความต้านแรงดึง แนวขนานเครื่อง ไม่น้อยกว่า	kN/m	5.14	1.90	1.40	-	-
ความต้านแรงดันทะลุ ไม่น้อยกว่า	kPa	282	130	-	55	55
ความทึบแสง ไม่น้อยกว่า	%	85.8	-	95.5	81	81
ความขาวสว่าง ไม่น้อยกว่า	%	34	-	-	75	75

หมายเหตุ : A คือ กระดาษที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน, B คือ กระดาษห่อของ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษเหนียว มอก. 170 – 2550, C คือ กระดาษหนังสือพิมพ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรมกระดาษหนังสือพิมพ์ มอก. 758 – 2551, D คือ กระดาษพิมพ์ และ E คือกระดาษเขียนมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรม กระดาษพิมพ์เขียน มอก. 287 – 2533

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยเชื้อราทำให้สามารถลดปริมาณความต้องการใช้สารเคมีได้ ทั้งนี้หากมีการปรับปรุงการเตรียมวัตถุดิบ ประยุกต์และปรับวิธีการผลิตเยื่อ จะทำให้สมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การตัดชิ้นลำต้นข้าวโพดควรใช้เครื่องมือที่สามารถควบคุมขนาดของชิ้นลำต้นข้าวโพดที่ตัดได้หรืออาจมีการคัดแยก เพื่อความสม่ำเสมอของชิ้นวัตถุดิบ
2. ลดเวลาหรือลดปริมาณเชื้อราในการปรับสภาพด้วยเชื้อ
3. ลดปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือลดเวลาขณะต้มเยื่อลง
4. ประยุกต์ใช้ soda – antharaquinone ในการผลิตเยื่อ
5. ควรมีการวิเคราะห์การกระจายตัวของความยาวเส้นใย สัดส่วนปริมาณของเส้นใยในช่วงความยาวต่างๆ เพื่อจะได้ทราบถึงอิทธิพลของการปรับสภาพด้วยเชื้อราที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงต่อเส้นใย

รายการอ้างอิง

[1] Swann,C.E.The Future of Fiber. Paper 360° 9 (October 2006) : 10-12.

[2] Plant Anatomy [Online]. (n.d.). Available from:
http://preuniversit.grkraj.org/html/3_PLANT_ANATOMY.htm. [2010, April 24]

[3] Increased Property Space of Paper by the Addition of Nanofibrillar Cellulose -Tero Taipale. [Online]. (n.d.). Available from:
http://www.umk.fi/en/NL0209/newsletter_NL0209_Taipale.html.[2010, April 24]

[4] Sven,A.R. Pulping Processes. New York : John Wiley & Sons, 1965.

[5] Meylan,B.A. and Butterfield,B.G.. Three-dimensional structure of wood. Hong Kong : Syracuse University Press, 1972.

[6] Sjöström, E. Wod Chemistry Fundamentals and Applications. USA : Acadimic Press,1993

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

[8] Plant Structure & Function [Online]. (n.d.). Available from:
http://sci.waikato.ac.nz/farm/content/plantstructure.html. [2010,February 14]

[9] Hemicellulose structure [Online]. (n.d.). Available from:
http://www.paperonweb.com/dict11.htm#c [2010, February 11]

[10] Biodegradation of lignin and hemicellulose [Online]. (n.d.). Available from: http://www.fpl.fs.fs.fed.us/ducumnts/pdf1994 /jeffr94b.pdf [2009, June 30]

[11] Lignin Related Enzymes [Online]. (n.d.). Available from:
http://www.sigmaaldrich.com/life-science/metabolomics/enzym-explorer/rnalytical-enzymes/enzymes-for-aer.html [2010, February 11]

[12] คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา. พืชเศรษฐกิจ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.

[13] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. โครงการทรัพยากรพืชในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี :สำนักพิมพ์สหมิตรพริ้นติ้ง, 2544.

[14] Maize [Online]. (n.d.). Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Maize [2010, April 24]

[15] ข้าวโพด [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://www.wikipedia.org [21 มีนาคม 2553]

[16] กฤษฎา สัมพันธารักษ์. พืชไร่. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช, 2531.

[17] ลำต้นข้าวโพด [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://www.images.google.co.th/images?hl=th [12 มีนาคม 2552]

[18] การแปรรูปและการใช้ประโยชน์จากข้าวโพด [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://www.as.doa.go.th [21 มีนาคม 2553]

[19] Reddy, N., and Yang, Y. Structure and Properties of High Quality Natural Cellulose Fibers from Cornstalks. Polymer 46 (2005) : 5494-5500.

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

[21] Rymsza, T.A. Agricultural Residues in Pulp and Paper Discussion Paper [Online]. (n.d.). Available from: http:// www.visionpaper.com [2010, April 24]

[22] Casey,J.P. Pulp and Paper Chemical and Chemical Technology. 3rd ed. USA : Wiley-Interscience, 1980.

[23] Biermann,C.J. Pulping and Papermaking. UK : Acadamic Press, 1996.

[24] Gullichsen,J.,and Paulapuro,H. Chemical Pulping. Papermaking Science and Technology. USA : Tappi Press, 2000.

[25] Paper Making Process [Online]. (n.d.). Available from: http://www.shoalhaven paper mill.com.au/manufacturing.html [2010, February 11]

[26] ศักยภาพและการประยุกต์ทางเทคโนโลยีชีวภาพ [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http:// www.Std.kku.ac.th/4830500452/งาน/ศักยภาพ.doc [24 เมษายน 2553]

[27] The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability [Online]. (n.d.). Available from: http:// www.oecd.org/dataoecd/61/13/1947629.pdf [2010, April 24]

[28] การคัดเลือกจุลินทรีย์เพื่อการผลิตเยื่อกระดาษ [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://posaa.kapi.ku.ac.th/ [16 มิถุนายน 2552]

[29] Akhtar, M. Overview of Biomechanical and Biochemical Pulping Research [Online] 1998. Available from:http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1998/akhta98a.pdf [2009, June 16]

[30] Biopulping Technology [Online]. (n.d.). Available from: http://www.biopulping.com/2.html [2010, February 11]

[31] White Rot Fungi [Online]. (n.d.). Available from: http://www./world.of.fungi.org [2009, June 16]

[32] เชื้อราทำลายไม้ [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://www.forest.go.th/Forprod/microbiology/Micrology_woodPhathology/mushroom.pdf [14 ตุลาคม 2552]

[33] ราอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: http://yalor.yru.ac.th~%7dolah [15 ตุลาคม 2552]

[34] *Phanerochaete chrysosporium* [Online].(n.d.). Available from: http://www.sciencedaily.com/releases/2004/05/040504062021.htm [2009, June 16]

[35] White Rot Fungi Degradation System [Online].(n.d.). Available from: http://www.world.of.fungi.org/Mostly_Mycology/Lucy_Goofeve [2009, June 16]

[36] xylanase enzyme [Online].(n.d.). Available from: http://greatvistachemicals.com/biochemicals/xylanase.htm [2009, April 26]

[37] xylanase [Online].(n.d.). Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/xylanase [2009, April 26]

[38] A new enzyme with xylanase activity adapted for pulp and paper industrial processes and agrofood applications [Online].(n.d.). Available from: http://www.invenia.es/tech:06_be_wldg_0fti [2009, April 26]

[39] Scott, G.M. and Swaney, R. New Technology for Papermaking *:* Biopulping Economics. TAPPi Journal 81,12 (December 1998) : 153-157

[40] Bajpai, P., Mishra, S.P., Mishra, O.P., Kumar, S., Bajpai, P.K., and Singh, S. Biochemical Pulping of Wheat straw. TAPPi Journal 3,8 (2004) : 3-6

[41] กิติยา, การใช้เชื้อราช่วยในการผลิตเยื่อแบบซัลเฟตของไม้กระถินเทพา [online]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา : http://www.forest.go.th/forprod/Tips/Silvicebook/Forest_Proceedings/oral/Session4/t13.pdf [16 มิถุนายน 2552]

[42] Yang, Q., Zhan, H., Wang, S., Fu, S. and Li, K. Modification of Eucalyptus CTMP Fibers with White-Rot Fungus Trametes Hirsute-Effects on Fibre Morphology and Paper Physical Strengths. Bioresource Tecnology 99 (2008) : 8118-8124.

[43] Mohiuddin, GH., Rashid, M., Rahman, M., Hasib, S.A. and Razzaque, A. Biochemical Pulping of Whole Jute Plant in Soda-Anthraquinone (AQ) and Kraft Processes. TAPPi Journal 4,3 (2005) : 23-27.

[44] Leatham,G.F., Myers,G.C. and Wegner,Th.h. Biomechanical Pulping of Aspen Chips:Energy Savings Resulting from Different Fungal Treatments. TAPPi Journal 73,5 (1990) : 197-200.

[45] Behrendt,C.J.and others. Biomechanical Pulping with *Phlebiopsis gigantean* Reduced Energy Consumpsion and Increased Paper Strength . 2000 TAPPi Journal Peer Reviewed Paper (September 2000) : 1-8.

[46] Akhtar,M., Lentz,M.J., Blanchette,R.A. and Kirk,T.K. Corn Steep liquor Lowers the Amount of Inoculum for Biopulping. TAPPi Journal 80,6 (1997) : 161-164.

[47] Kashino,Y. and others.Biomechanical Pulping Using White – Rot Fungi IZU – 145 . .TAPPi Journal 72,12 (December 1993) : 167-171.

[48] Bustamante,P., Romos,J., ZuniiGa,V., Sabharwal,H.M. and Young, R.A. Biomechaical Pulping of Bagasse with the White Rot Fungi *Ceriporiopsis subvermispora* and *Pleurotus ostreatus*. TAPPi Journal 82,6 (June 1999) : 123-127.

[49] Scott,G.M., Akhtar,M., Lentz,M.J., Kirk,T.K. and Swaney,R. New Technology for Papermaking:Commercializing Biopulping. TAPPi Journal 81,11 (November 1998) : 123-127.

[50] Marton,R., Granzow,S.G. and Eriksson,K.L. Biomechanical Pulping with White – Rot Fungi. TAPPi Journal (August 1990) : 141-147.

[51] Sabharwal,H.S., Akhtar,M., Blanchette,R.A. and Young,R. Biomechanical Pulping of Kenaf. TAPPi Journal 77,12 (December 1994) : 105-112.

[52] Myers,G.C. and Kirk,T.K. Biomechanical Pulping of Loblolly Pine with Different Strains of the White – Rot Fungi *Ceriporiopsis subvermispora.* TAPPi Journal (February 1992) : 105-109.

[53] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์และเขียน . 300, 4.กรุงเทพมหานคร: เชาวกิจการพิมพ์, 2545.

[54] อุตสาหกรรม, กระทรวง. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษหนังสือพิมพ์ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2551. (อัดสำเนา)

[55] อุตสาหกรรม, กระทรวง. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษเหนียว สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550. (อัดสำเนา)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูลดิบ

การทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ ก.1 ปริมาณผลผลิตเยื่อ

ครั้งที่	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	41.41	44.29	48.49	50.39
2	38.58	48.10	49.03	50.49
ค่าเฉลี่ย	40.00	46.20	48.76	50.44

ตารางที่ ก.2 ความยาวเส้นใย

ครั้งที่	ความยาวเส้นใย (mm.)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	1.57	1.55	1.34	1.35
2	1.53	1.44	1.37	1.33
ค่าเฉลี่ย	1.55	1.50	1.36	1.34

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 5 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.3 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

ครั้งที่	**ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)**			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	26.69	31.13	36.40	33.22
2	27.21	31.94	35.82	34.73
ค่าเฉลี่ย	26.95	31.54	36.11	34.00

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 5 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.4 ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ

ครั้งที่	**ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)**			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	0.00	0.00	1.20	0.80
2	0.00	0.00	1.10	0.06
ค่าเฉลี่ย	26.95	31.54	1.15	0.70

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.5 ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ

ครั้งที่	**ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ**			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	25.13	23.97	22.61	21.08
2	25.77	24.34	22.20	20.79
ค่าเฉลี่ย	25.45	24.17	22.41	20.94

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.6 ความหนาแน่นปรากฏ

ครั้งที่	**ความหนาแน่นปรากฏ** (g/cm^3)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	0.76	0.69	0.65	0.72
2	0.71	0.67	0.64	0.75
ค่าเฉลี่ย	0.74	0.68	0.65	0.74

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 10 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.7 ความทึบแสง

ครั้งที่	ความทึบแสง (%)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	79.27	86.00	83.22	81.77
2	82.38	86.05	83.03	81.30
ค่าเฉลี่ย	80.83	86.03	83.13	81.54

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 10 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.8 ความขาวสว่าง

ครั้งที่	ความขาวสว่าง (%)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	21.40	24.45	31.55	33.15
2	22.62	25.98	31.73	32.71
ค่าเฉลี่ย	22.01	25.22	31.64	32.93

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 10 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.9 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

ครั้งที่	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง** (Nm/g)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	89.60	88.11	93.24	88.67
2	89.29	85.90	94.27	89.53
ค่าเฉลี่ย	89.45	87.01	93.76	89.10

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 10 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.10 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ครั้งที่	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ** ($kPa.m^2/g$)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	4.82	4.75	5.43	5.15
2	4.80	4.79	5.34	5.22
ค่าเฉลี่ย	4.81	4.77	5.39	5.19

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 10 ค่าการทดสอบ

ตารางที่ ก.11 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด

ครั้งที่	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด** (Nm^2/Kg)			
	NaOH 15% 1 hr.	NaOH 15% 2 hr.	NaOH 20% 1 hr.	NaOH 20% 2 hr.
1	3.97	5.87	6.42	6.00
2	4.00	5.50	6.43	6.09
ค่าเฉลี่ย	4.00	5.69	6.43	6.05

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 10 ค่าการทดสอบ

การทดลองส่วนที่ 2

ตารางที่ ก.12 ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ

ครั้งที่	**ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ**								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	22.06	21.00	20.53	23.49	21.04	22.97	21.12	22.8	21.6
2	21.87	21.69	20.21	22.81	21.74	22.75	20.87	22.62	21.02
3	22.39	20.98	20.43	23.26	21.82	23.11	21.91	22.94	20.79
ค่าเฉลี่ย	22.11	21.38	20.39	23.25	21.53	22.94	21.30	22.73	21.14

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ค่าการทดสอบ

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.13 ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย

ครั้งที่	ปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใย (%)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	87.63	88.50	89.76	87.86	88.17	86.69	88.13	86.32	88.67
2	88.00	88.30	88.90	87.46	88.77	86.88	88.63	87.13	87.47
3	87.47	88.43	88.81	87.54	87.8	85.92	88.40	86.69	88.38
ค่าเฉลี่ย	88.41	89.16	87.62	88.25	86.50	88.39	86.71	88.17	21.14

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.14 ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย

ครั้งที่	ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใย (%)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	69.95	71.57	70.35	71.37	70.32	70.48	69.92	70.64	69.74
2	70.23	70.07	70.01	70.33	69.24	70.45	69.52	71.80	68.78
3	69.73	70.33	70.43	71.22	69.31	70.66	69.17	70.53	69.34
ค่าเฉลี่ย	69.84	70.66	70.26	70.97	69.62	70.53	69.54	70.99	69.29

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.15 ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ

ครั้งที่	**ปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ (g/l)**								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	2.80	4.57	4.80	4.10	3.80	4.60	4.60	5.00	5.60
2	3.50	4.60	4.70	3.80	4.30	4.20	4.00	5.20	5.80
3	2.70	4.11	4.75	4.10	4.10	4.40	4.10	4.80	5.40
ค่าเฉลี่ย	3.00	4.57	4.75	4.00	4.20	4.40	4.70	5.00	5.60

หมายเหตุ : 1 ครั้ง เป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ค่าการทดสอบ

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.16 ปริมาณผลผลิตเยื่อ

ครั้งที่	ปริมาณผลผลิตเยื่อ (%)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	56.42	55.85	54.8	49.78	49.23	46.8	45.62	42.33	36.81
2	50.08	53.21	46.38	55.04	50.17	49.43	42.65	40.88	40.83
3	55.26	51.6	64.16	53.79	48.84	45.13	44.92	42.19	39.55
ค่าเฉลี่ย	53.92	53.55	53.11	52.87	52.87	47.12	44.01	41.80	39.06

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.17 ความยาวเส้นใย

ครั้งที่	**ความยาวเส้นใย (mm.)**								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	1.40	1.70	1.62	1.50	1.68	1.64	1.71	1.65	1.65
2	1.52	1.61	1.60	1.66	1.57	1.61	1.60	1.74	1.67
3	1.53	1.60	1.62	1.63	1.63	1.70	1.65	1.66	1.80
ค่าเฉลี่ย	1.47	1.64	1.62	1.59	1.63	1.65	1.65	1.68	1.71

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.18 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

ครั้งที่	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	27.62	32.76	32.74	31.88	31.37	23.98	19.33	18.73	18.30
2	29.87	32.51	30.24	28.17	31.66	25.64	19.47	19.32	16.10
3	31.26	33.16	30.81	32.17	32.17	20.36	19.90	17.23	16.92
ค่าเฉลี่ย	29.89	32.71	31.26	30.74	31.73	23.34	19.57	18.42	17.10

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.19 สภาพระบายได้

ครั้งที่	**สภาพระบายได้** (ml.)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	482	399	411	424	416	499	582	644	629
2	446	359	419	471	397	526	570	608	648
3	487	393	396	464	392	507	571	643	635
ค่าเฉลี่ย	427	384	400	453	402	511	574	632	637

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.20 ความพรุน

ครั้งที่	**ความพรุน** (ml/min)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	79.00	44.70	71.50	113.80	72.40	228.60	420.00	672.40	1157.20
2	87.00	55.70	55.40	76.00	60.80	171.80	733.60	444.30	576.00
3	95.00	49.70	43.60	81.00	75.80	154.00	495.80	598.00	1451.20
ค่าเฉลี่ย	87.00	50.00	56.80	90.30	69.70	184.80	549.80	571.60	1061.50

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.21 ความเรียบ

ครั้งที่	ความเรียบ (s)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	7.40	9.80	10.40	12.00	8.20	7.00	6.40	7.00	7.80
2	13.00	11.80	12.30	10.30	9.40	7.40	7.70	11.50	7.00
3	8.60	8.00	8.20	10.20	7.40	9.00	8.00	10.00	8.20
ค่าเฉลี่ย	9.70	9.90	10.30	10.80	8.30	7.80	7.30	9.50	7.70

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.22 ความทึบแสง

ครั้งที่	**ความทึบแสง(%)**								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	85.48	84.66	85.94	89.92	87.15	93.49	88.32	90.82	87.74
2	84.96	87.2	86.43	90.24	86.78	92.6	88.83	91.34	88.71
3	85.13	85.64	83.3	89.57	86.16	92.4	87.87	90.84	86.33
ค่าเฉลี่ย	85.19	85.83	86.22	89.91	86.70	92.83	88.32	91.00	84.35

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.23 ความขาวสว่าง

ครั้งที่	ความขาวสว่าง(%)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	33.95	34.39	34.15	29.74	31.45	28.11	34.18	33.45	35.56
2	32.68	33.50	33.99	29.32	30.26	27.98	33.83	35.01	33.87
3	31.78	34.58	35.31	30.20	32.70	29.23	33.29	33.20	34.70
ค่าเฉลี่ย	32.47	34.16	34.48	29.75	31.47	28.44	33.77	33.22	34.70

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.24 ความหนาแน่นปรากฏ

ครั้งที่	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	0.66	0.56	0.61	0.61	0.57	0.60	0.61	0.59	0.56
2	0.63	0.55	0.57	0.61	0.59	0.61	0.62	0.63	0.63
3	0.69	0.59	0.60	0.58	0.62	0.58	0.59	0.58	0.57
ค่าเฉลี่ย	0.66	0.57	0.59	0.60	0.59	0.60	0.61	0.60	0.59

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.25 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

ครั้งที่	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)**								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	88.51	82.32	86.95	77.89	78.97	73.94	72.6	73.99	73.34
2	88.7	85.96	84.48	77.46	79.69	73.63	73.83	74.69	63.19
3	88.05	83.73	87.42	77.87	79.69	73.59	72.54	74.88	69.09
ค่าเฉลี่ย	88.42	84.00	86.29	77.74	79.45	73.72	72.99	74.52	68.54

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.26 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ครั้งที่	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (kPa.m^2/g)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	4.98	4.75	4.70	3.28	3.96	3.48	3.23	3.50	3.52
2	5.38	4.62	4.56	3.68	4.03	2.93	3.15	3.01	3.30
3	5.51	4.47	4.55	3.48	4.09	3.01	3.24	3.15	3.09
ค่าเฉลี่ย	5.29	4.61	4.59	3.44	4.03	3.14	3.21	3.22	3.30

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ตารางที่ ก.27 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด

ครั้งที่	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Nm^2/Kg)								
	control	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
1	6.29	7.173	7.88	6.58	5.73	5.94	4.73	5.86	4.86
2	6.03	7.49	7.25	5.93	5.1	5.77	4.95	5.98	4.27
3	6.55	7.41	7.62	6.34	5.56	5.93	4.84	5.89	4.57
ค่าเฉลี่ย	6.29	7.36	7.58	6.25	5.46	5.88	4.84	5.91	4.57

หมายเหตุ :

A1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 5 วัน A2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 5 วัน

B1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 10 วัน B2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 10 วัน

C1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 20 วัน C2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 20 วัน

D1 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น 30 วัน D2 คือ ปรับสภาพด้วยเชื้อรา 20 ชิ้นวุ้น 30วัน

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)

การทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณผลผลิตเยื่อ

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	79.99	97.12	177.11
Average	39.995	48.56	44.2775
Variance	4.00445	0.4418	25.93516
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	92.39	100.88	193.27
Average	46.195	50.44	48.3175
Variance	7.25805	0.005	8.427692
Total			
Count	4	4	
Sum	172.38	198	
Average	43.095	49.5	
Variance	16.5675	1.32706667	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	32.6432	1	32.6432	11.1512	0.028853	7.708647
Columns	82.04805	1	82.04805	28.02834	0.006111	7.708647
Interaction	9.3312	1	9.3312	3.18762	0.148747	7.708647
Within	11.7093	4	2.927325			
Total	135.73175	7				

ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของความยาวเส้นใย

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	3.1	2.71	5.81
Average	1.55	1.355	1.4525
Variance	0.0008	0.00045	0.013092
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	2.99	2.68	5.67
Average	1.495	1.34	1.4175
Variance	0.00605	0.0002	0.010092
Total			
Count	4	4	
Sum	6.09	5.39	
Average	1.5225	1.3475	
Variance	0.003291667	0.000291667	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.00245	1	0.00245	1.306667	0.316767	7.708647
Columns	0.06125	1	0.06125	32.66667	0.004636	7.708647
Interaction	0.0008	1	0.0008	0.426667	0.549272	7.708647
Within	0.0075	4	0.001875			
Total	0.072	7				

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	53.9	72.22	126.12
Average	26.95	36.11	31.53
Variance	0.1352	0.1682	28.06967
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	63.07	67.95	131.02
Average	31.535	33.975	32.755
Variance	0.32805	1.14005	2.4739
Total			
Count	4	4	
Sum	116.97	140.17	
Average	29.2425	35.0425	
Variance	7.161825	1.955491667	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	3.00125	1	3.00125	6.776743	0.059845	7.708647
Columns	67.28	1	67.28	151.9165	0.000249	7.708647
Interaction	22.5792	1	22.5792	50.98323	0.002035	7.708647
Within	1.7715	4	0.442875			
Total	94.63195	7				

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อ

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	0	2.3	2.3
Average	0	1.15	0.575
Variance	0	0.005	0.4425
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	0	1.4	1.4
Average	0	0.7	0.35
Variance	0	0.02	0.17
Total			
Count	4	4	
Sum	0	3.7	
Average	0	0.925	
Variance	0	0.075833333	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.10125	1	0.10125	16.2	0.0158	7.708647
Columns	1.71125	1	1.71125	273.8	7.81E-05	7.708647
Interaction	0.10125	1	0.10125	16.2	0.0158	7.708647
Within	0.025	4	0.00625			
Total	1.93875	7				

ตารางที่ ข.5 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	50.9	44.81	95.71
Average	25.45	22.405	23.9275
Variance	0.2048	0.08405	3.186958
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	48.31	41.87	90.18
Average	24.155	20.935	22.545
Variance	0.06845	0.04205	3.492967
Total			
Count	4	4	
Sum	99.21	86.68	
Average	24.8025	21.67	
Variance	0.650091667	0.762333333	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	3.8226125	1	3.822613	38.28834	0.003467	7.708647
Columns	19.6251125	1	19.62511	196.5706	0.00015	7.708647
Interaction	0.0153125	1	0.015312	0.153374	0.7153	7.708647
Within	0.39935	4	0.099838			
Total	23.8623875	7				

ตารางที่ ข.6 การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นปรากฏ

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	1.47	1.29	2.76
Average	0.735	0.645	0.69
Variance	0.00125	5E-05	0.003133
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	1.36	1.47	2.83
Average	0.68	0.735	0.7075
Variance	0.0002	0.00045	0.001225
Total			
Count	4	4	
Sum	2.83	2.76	
Average	0.7075	0.69	
Variance	0.001491667	0.002866667	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.0006125	1	0.000613	1.25641	0.325078	7.708647
Columns	0.0006125	1	0.000613	1.25641	0.325078	7.708647
Interaction	0.0105125	1	0.010513	21.5641	0.009707	7.708647
Within	0.00195	4	0.000488			
Total	0.0136875	7				

ตารางที่ ข.7 การวิเคราะห์ทางสถิติของความทึบแสง

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	161.65	166.25	327.9
Average	80.825	83.125	81.975
Variance	4.83605	0.01805	3.381367
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	172.05	163.07	335.12
Average	86.025	81.535	83.78
Variance	0.00125	0.11045	6.757267
Total			
Count	4	4	
Sum	333.7	329.32	
Average	83.425	82.33	
Variance	10.6257667	0.885533333	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	6.51605	1	6.51605	5.248741	0.083764	7.708647
Columns	2.39805	1	2.39805	1.931653	0.23693	7.708647
Interaction	23.05205	1	23.05205	18.56865	0.012555	7.708647
Within	4.9658	4	1.24145			
Total	36.93195	7				

ตารางที่ ข.8 การวิเคราะห์ทางสถิติของความขาวสว่าง

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	44.02	63.28	107.3
Average	22.01	31.64	26.825
Variance	0.7442	0.0162	31.16577
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	50.43	65.86	116.29
Average	25.215	32.93	29.0725
Variance	1.17045	0.0968	20.26283
Total			
Count	4	4	
Sum	94.45	129.14	
Average	23.6125	32.285	
Variance	4.062225	0.592366667	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	10.1025125	1	10.10251	19.9295	0.011124	7.708647
Columns	150.424513	1	150.4245	296.7465	6.66E-05	7.708647
Interaction	1.8336125	1	1.833613	3.617217	0.129954	7.708647
Within	2.02765	4	0.506913			
Total	164.388288	7				

ตารางที่ ข.9 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	178.89	187.51	366.4
Average	89.445	93.755	91.6
Variance	0.04805	0.53045	6.384867
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	174.01	178.2	352.21
Average	87.005	89.1	88.0525
Variance	2.44205	0.3698	2.400292
Total			
Count	4	4	
Sum	352.9	365.71	
Average	88.225	91.4275	
Variance	2.814566667	7.52309167	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	25.1695125	1	25.16951	29.69547	0.005509	7.708647
Columns	20.5120125	1	20.51201	24.20047	0.007933	7.708647
Interaction	2.4531125	1	2.453113	2.894229	0.164116	7.708647
Within	3.39035	4	0.847587			
Total	51.5249875	7				

ตารางที่ ข.10 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	9.62	10.77	20.39
Average	4.81	5.385	5.0975
Variance	0.0002	0.00405	0.111625
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	9.54	10.37	19.91
Average	4.77	5.185	4.9775
Variance	0.0008	0.00245	0.058492
Total			
Count	4	4	
Sum	19.16	21.14	
Average	4.79	5.285	
Variance	0.000866667	0.0155	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.0288	1	0.0288	15.36	0.01726	7.708647
Columns	0.49005	1	0.49005	261.36	8.56E-05	7.708647
Interaction	0.0128	1	0.0128	6.826667	0.059246	7.708647
Within	0.0075	4	0.001875			
Total	0.53915	7				

ตารางที่ ข.11 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด

SUMMARY	NaOH 15%	NaOH 20%	Total
1hr-1			
Count	2	2	4
Sum	7.97	12.85	20.82
Average	3.985	6.425	5.205
Variance	0.00045	5E-05	1.9847
2hr-1			
Count	2	2	4
Sum	11.37	12.09	23.46
Average	5.685	6.045	5.865
Variance	0.06845	0.00405	0.067367
Total			
Count	4	4	
Sum	19.34	24.94	
Average	4.835	6.235	
Variance	0.9863	0.0495	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.8712	1	0.8712	47.73699	0.002302	7.708647
Columns	3.92	1	3.92	214.7945	0.000126	7.708647
Interaction	2.1632	1	2.1632	118.5315	0.000404	7.708647
Within	0.073	4	0.01825			
Total	7.0274	7				

การทดลองส่วนที่ 2

ตารางที่ ข.12 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	63.67	69.56	68.83	68.36	270.42
Average	21.22333	23.18667	22.94333	22.78667	22.535
Variance	0.163433	0.119633	0.032933	0.025733	0.709918
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	61.17	64.6	63.9	63.41	253.08
Average	20.39	21.53333	21.3	21.13667	21.09
Variance	0.0268	0.184133	0.2947	0.174233	0.323473
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	124.84	134.16	132.73	131.77	
Average	20.80667	22.36	22.12167	21.96167	
Variance	0.284427	0.94156	0.941217	0.896737	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	12.52815	1	12.52815	98.10611	3.14E-08	4.493998
Columns	8.57575	3	2.858583	22.38515	5.71E-06	3.238872
Interaction	0.74835	3	0.24945	1.953406	0.161736	3.238872
Within	2.0432	16	0.1277			
Total	23.89545	23				

ตารางที่ ข.13 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	66.32	22.1066667	0.0692333
Column 2	3	63.67	21.2233333	0.1634333

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	1.170416667	1	1.17041667	10.060888	0.033797	7.708647
Within Groups	0.465333333	4	0.11633333			
Total	1.63575	5				

ตารางที่ ข.14 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	263.1	87.7	0.0739
Column 2	3	265.23	88.41	0.0103

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.75615	1	0.75615	17.96081	0.013285	7.708647
Within Groups	0.1684	4	0.0421			
Total	0.92455	5				

ตารางที่ ข.15 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโฮโลเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	265.23	262.86	259.49	260.14	1047.72
Average	88.41	87.62	86.49667	86.71333	87.31
Variance	0.0103	0.0448	0.258433	0.164433	0.720618
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	267.47	264.74	265.16	264.52	1061.89
Average	89.15667	88.24667	88.38667	88.17333	88.49083
Variance	0.275033	0.239633	0.062633	0.392033	0.343863
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	532.7	527.6	524.65	524.66	
Average	88.78333	87.93333	87.44167	87.44333	
Variance	0.281387	0.231587	1.200057	0.862067	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	8.366204	1	8.366204	46.24448	4.26E-06	4.493998
Columns	7.200013	3	2.400004	13.2661	0.000132	3.238872
Interaction	1.614679	3	0.538226	2.975065	0.062911	3.238872
Within	2.8946	16	0.180913			
Total	20.0755	23				

ตารางที่ ข.16 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	211.97	212.92	211.59	212.97	849.45
Average	70.65667	70.97333	70.53	70.99	70.7875
Variance	0.642533	0.316033	0.0129	0.4951	0.310002
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	210.79	208.87	208.61	207.86	836.13
Average	70.26333	69.62333	69.53667	69.28667	69.6775
Variance	0.049733	0.365233	0.140833	0.232533	0.284802
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	422.76	421.79	420.2	420.83	
Average	70.46	70.29833	70.03333	70.13833	
Variance	0.32332	0.819257	0.357507	1.161457	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	7.3926	1	7.3926	26.22768	0.000103	4.493998
Columns	0.62775	3	0.20925	0.742383	0.542266	3.238872
Interaction	1.4053	3	0.468433	1.661921	0.215051	3.238872
Within	4.5098	16	0.281862			
Total	13.93545	23				

ตารางที่ ข.17 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	209.91	69.97	0.0628
Column 2	3	211.97	70.65667	0.642533

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.707267	1	0.707267	2.005482	0.229673	7.708647
Within Groups	1.410667	4	0.352667			
Total	2.117933	5				

ตารางที่ ข.18 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*	
Column 1		3	9	3	0.19
Column 2	3	13.28	4.426667	0.075433	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	3.053067	1	3.053067	23.0044	0.008672	7.708647
Within Groups	0.530867	4	0.132717			
Total	3.583933	5				

ตารางที่ ข.19 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณด่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	13.28	12	13.2	15	53.48
Average	4.426667	4	4.4	5	4.456667
Variance	0.075433	0.03	0.04	0.04	0.172224
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	14.25	12.2	12.7	16.8	55.95
Average	4.75	4.066667	4.233333	5.6	4.6625
Variance	0.0025	0.063333	0.103333	0.04	0.426875
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	27.53	24.2	25.9	31.8	
Average	4.588333	4.033333	4.316667	5.3	
Variance	0.062537	0.038667	0.065667	0.14	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.254204	1	0.254204	5.153658	0.03737	4.493998
Columns	5.309946	3	1.769982	35.88407	2.47E-07	3.238872
Interaction	0.490946	3	0.163649	3.317762	0.046732	3.238872
Within	0.7892	16	0.049325			
Total	6.844296	23				

ตารางที่ ข.20 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณผลผลิตเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	160.66	158.61	141.36	125.4	586.03
Average	53.55333	52.87	47.12	41.8	48.83583
Variance	4.604033	7.5517	4.6993	0.6397	27.99259
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	165.34	148.24	133.19	117.19	563.96
Average	55.11333	49.41333	44.39667	39.06333	46.99667
Variance	79.10573	0.467433	2.410633	4.217733	54.24164
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	326	306.85	274.55	242.59	
Average	54.33333	51.14167	45.75833	40.43167	
Variance	34.21399	6.792217	5.068937	4.189777	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	20.2952	1	20.2952	1.565742	0.228813	4.493998
Columns	673.5472	3	224.5157	17.32103	2.8E-05	3.238872
Interaction	23.63685	3	7.878949	0.607848	0.61951	3.238872
Within	207.3925	16	12.96203			
Total	924.8718	23				

ตารางที่ ข.21 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณผลผลิตเยื่อจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	161.76	53.92	11.3956
Column 2	3	160.66	53.55333	4.604033

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.201667	1	0.201667	0.025209	0.881541	7.708647
Within Groups	31.99927	4	7.999817			
Total	32.20093	5				

ตารางที่ ข.22 การวิเคราะห์ทางสถิติของความยาวเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	4.4385	1.4795	0.006153
Column 2	3	4.91855	1.639517	0.002772

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.038408	1	0.038408	8.607075	0.042653	7.708647
Within Groups	0.01785	4	0.004462			
Total	0.056258	5				

ตารางที่ ข.23 การวิเคราะห์ทางสถิติของความยาวเส้นใยจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	4.91855	4.7808	4.9474	5.046	19.69275
Average	1.639517	1.5936	1.649133	1.682	1.641063
Variance	0.002772	0.006911	0.002558	0.002368	0.003746
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	4.8383	4.875	4.9601	5.1185	19.7919
Average	1.612767	1.625	1.653367	1.706167	1.649325
Variance	6.75E-05	0.002919	0.003275	0.006365	0.003707
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	9.75685	9.6558	9.9075	10.1645	
Average	1.626142	1.6093	1.65125	1.694083	
Variance	0.00135	0.004228	0.002339	0.003669	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.00041	1	0.00041	0.12032	0.733208	4.493998
Columns	0.024469	3	0.008156	2.395868	0.106306	3.238872
Interaction	0.003046	3	0.001015	0.298204	0.826178	3.238872
Within	0.05447	16	0.003404			
Total	0.082394	23				

ตารางที่ ข.24 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	98.43884	92.213	69.985	55.272	315.9088
Average	32.81295	30.73767	23.32833	18.424	26.32574
Variance	0.107661	4.961858	7.307524	1.156252	38.72539
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	93.79	95.197	58.701	51.3122	299.0002
Average	31.26333	31.73233	19.567	17.10407	24.91668
Variance	1.708929	0.162726	0.086436	1.237256	48.6871
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	192.2288	187.41	128.686	106.5842	
Average	32.03814	31.235	21.44767	17.76403	
Variance	1.447027	2.346642	7.201873	1.48007	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	11.91259	1	11.91259	5.696858	0.029688	4.493998
Columns	911.0719	3	303.6906	145.2314	8.14E-12	3.238872
Interaction	17.00819	3	5.669395	2.711228	0.079614	3.238872
Within	33.45729	16	2.09108			
Total	973.45	23				

ตารางที่ ข.25 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	4.4385	1.4795	0.006153
Column 2	3	4.91855	1.639517	0.002772

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.038408	1	0.038408	8.607075	0.042653	7.708647
Within Groups	0.01785	4	0.004462			
Total	0.056258	5				

ตารางที่ ข.26 การวิเคราะห์ทางสถิติของสภาพระบายได้จากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	1415	471.6667	500.3333
Column 2	3	1151	383.6667	465.3333

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	11616	1	11616	24.05799	0.008016	7.708647
Within Groups	1931.333	4	482.8333			
Total	13547.33	5				

ตารางที่ ข.27 การวิเคราะห์ทางสถิติของสภาพระบายได้จากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	1151	1359	1532	1895	5937
Average	383.6667	453	510.6667	631.6667	494.75
Variance	465.3333	643	192.3333	420.3333	9335.295
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	1226	1205	1723	1912	6066
Average	408.6667	401.6667	574.3333	637.3333	505.5
Variance	136.3333	160.3333	44.33333	94.33333	11609
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	2377	2564	3255	3807	
Average	396.1667	427.3333	542.5	634.5	
Variance	428.1667	1111.867	1310.7	215.5	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	693.375	1	693.375	2.572422	0.128296	4.493998
Columns	215749.5	3	71916.49	266.8103	7.2E-14	3.238872
Interaction	10325.13	3	3441.708	12.76874	0.000163	3.238872
Within	4312.667	16	269.5417			
Total	231080.6	23				

ตารางที่ ข.28 การวิเคราะห์ทางสถิติของความพรุนจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	150.1	270.8	554.4	1714.7	2690
Average	50.03333	90.26667	184.8	571.5667	224.1667
Variance	30.33333	421.6133	1518.04	13531.44	49315.2
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	170.5	209	1649.4	3184.4	5213.3
Average	56.83333	69.66667	549.8	1061.467	434.4417
Variance	196.1433	61.85333	26773.24	198367.4	227013.4
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	320.6	479.8	2203.8	4899.1	
Average	53.43333	79.96667	367.3	816.5167	
Variance	104.4627	320.6947	51284.01	156760.1	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	265293.5	1	265293.5	8.810074	0.009061	4.493998
Columns	2262562	3	754187.2	25.04564	2.77E-06	3.238872
Interaction	295253	3	98417.65	3.268331	0.048751	3.238872
Within	481800.2	16	30112.51			
Total	3304908	23				

ตารางที่ ข.29 การวิเคราะห์ทางสถิติของความพรุนจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	261	87	64
Column 2	3	150.1	50.03333	30.33333

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	2049.802	1	2049.802	43.45869	0.002743	7.708647
Within Groups	188.6667	4	47.16667			
Total	2238.468	5				

ตารางที่ ข.30 การวิเคราะห์ทางสถิติของความเรียบจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	29	9.666667	8.693333
Column 2	3	29.6	9.866667	3.613333

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.06	1	0.06	0.009751	0.92609	7.708647
Within Groups	24.61333	4	6.153333			
Total	24.67333	5				

ตารางที่ ข.31 การวิเคราะห์ทางสถิติของความเรียบจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	29.6	32.5	23.4	28.5	114
Average	9.866667	10.83333	7.8	9.5	9.5
Variance	3.613333	1.023333	1.12	5.25	3.310909
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	30.9	25	22.1	23	101
Average	10.3	8.333333	7.366667	7.666667	8.416667
Variance	4.21	1.013333	0.723333	0.373333	2.572424
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	60.5	57.5	45.5	51.5	
Average	10.08333	9.583333	7.583333	8.583333	
Variance	3.185667	2.689667	0.793667	3.257667	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	7.041667	1	7.041667	3.25125	0.090233	4.493998
Columns	22.125	3	7.375	3.405156	0.043386	3.238872
Interaction	7.938333	3	2.646111	1.221752	0.3341	3.238872
Within	34.65333	16	2.165833			
Total	71.75833	23				

ตารางที่ ข.32 การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นปรากฏจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	1.7	1.8	1.79	1.8	7.09
Average	0.566667	0.6	0.596667	0.6	0.590833
Variance	0.000433	0.0003	0.000233	0.0007	0.000517
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	1.78	1.78	1.82	1.76	7.14
Average	0.593333	0.593333	0.606667	0.586667	0.595
Variance	0.000433	0.000633	0.000233	0.001433	0.000555
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	3.48	3.58	3.61	3.56	
Average	0.58	0.596667	0.601667	0.593333	
Variance	0.00056	0.000387	0.000217	0.000907	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.000104	1	0.000104	0.189394	0.669235	4.493998
Columns	0.001546	3	0.000515	0.936869	0.445847	3.238872
Interaction	0.001446	3	0.000482	0.876263	0.474011	3.238872
Within	0.0088	16	0.00055			
Total	0.011896	23				

ตารางที่ ข.33 การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นปรากฏจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	3	1.98	0.66	0.0009
Column 2	3	1.7	0.566667	0.000433

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.013067	1	0.013067	19.6	0.011447	7.708647
Within Groups	0.002667	4	0.000667			
Total	0.015733	5				

ตารางที่ ข.34 การวิเคราะห์ทางสถิติของความทึบแสงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	3	255.57	85.19	0.0703
Column 2	3	257.5	85.83333	1.640933

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.620817	1	0.620817	0.725578	0.442315	7.708647
Within Groups	3.422467	4	0.855617			
Total	4.043283	5				

ตารางที่ ข.35 การวิเคราะห์ทางสถิติของความทึบแสงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	257.5	269.73	278.49	273	1078.72
Average	85.83333	89.91	92.83	91	89.89333
Variance	1.640933	0.1123	0.3367	0.0868	7.577388
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	255.67	260.09	265.02	262.78	1043.56
Average	85.22333	86.69667	88.34	87.59333	86.96333
Variance	2.834433	0.250233	0.2307	1.432233	2.333424
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	513.17	529.82	543.51	535.78	
Average	85.52833	88.30333	90.585	89.29667	
Variance	1.901777	3.242667	6.27499	4.089227	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	51.5094	1	51.5094	59.51117	8.86E-07	4.493998
Columns	82.98503	3	27.66168	31.95881	5.46E-07	3.238872
Interaction	12.18523	3	4.061744	4.69272	0.015522	3.238872
Within	13.84867	16	0.865542			
Total	160.5283	23				

ตารางที่ ข.36 การวิเคราะห์ทางสถิติของความขาวสว่างจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	102.47	89.26	85.32	101.66	378.71
Average	34.15667	29.75333	28.44	33.88667	31.55917
Variance	0.332433	0.193733	0.4723	0.962033	7.216772
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	103.45	94.41	101.3	104.13	403.29
Average	34.48333	31.47	33.76667	34.71	33.6075
Variance	0.518933	1.4887	0.201033	0.7141	2.325093
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	205.92	183.67	186.62	205.79	
Average	34.32	30.61167	31.10333	34.29833	
Variance	0.37256	1.557057	8.781347	0.873817	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	25.17402	1	25.17402	41.24127	8.45E-06	4.493998
Columns	72.21063	3	24.07021	39.43297	1.28E-07	3.238872
Interaction	22.98335	3	7.661117	12.55081	0.000179	3.238872
Within	9.766533	16	0.610408			
Total	130.1345	23				

ตารางที่ ข.37 การวิเคราะห์ทางสถิติของความขาวสว่างจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	98.41	32.80333	1.188633
Column 2	3	102.47	34.15667	0.332433

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	2.747267	1	2.747267	3.61229	0.130148	7.708647
Within Groups	3.042133	4	0.760533			
Total	5.7894	5				

ตารางที่ ข.38 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	265.26	88.42	0.1117
Column 2	3	252.01	84.00333	3.368433

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	29.26042	1	29.26042	16.81569	0.014845	7.708647
Within Groups	6.960267	4	1.740067			
Total	36.22068	5				

ตารางที่ ข.39 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	252.01	233.22	221.16	223.56	929.95
Average	84.003333	77.74	73.72	74.52	77.495833
Variance	3.3684333	0.0589	0.0367	0.2197	18.538772
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	258.85	238.35	218.97	205.62	921.79
Average	86.283333	79.45	72.99	68.54	76.815833
Variance	2.4942333	0.1728	0.5301	25.9825	54.314154
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	510.86	471.57	440.13	429.18	
Average	85.143333	78.595	73.355	71.53	
Variance	3.9045867	0.96991	0.38659	21.209	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	2.7744	1	2.7744	0.67537816	0.4232606	4.493998418
Columns	671.80615	3	223.935383	54.5130718	1.274E-08	3.238871522
Interaction	63.8493	3	21.2831	5.18099079	0.0108314	3.238871522
Within	65.726733	16	4.10792083			
Total	804.15658	23				

ตารางที่ ข.40 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	13.84	10.44	9.42	9.66	43.36
Average	4.613333	3.48	3.14	3.22	3.613333
Variance	0.019633	0.04	0.0883	0.0637	0.419352
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	13.81	12.08	9.62	9.91	45.42
Average	4.603333	4.026667	3.206667	3.303333	3.785
Variance	0.007033	0.004233	0.002433	0.046233	0.363955
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	27.65	22.52	19.04	19.57	
Average	4.608333	3.753333	3.173333	3.261667	
Variance	0.010697	0.107347	0.037627	0.046057	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.176817	1	0.176817	5.208789	0.036494	4.493998
Columns	7.78455	3	2.59485	76.4409	1.06E-09	3.238872
Interaction	0.288683	3	0.096228	2.834745	0.071253	3.238872
Within	0.543133	16	0.033946			
Total	8.793183	23				

ตารางที่ ข.41 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	15.87	5.29	0.0763
Column 2	3	13.84	4.613333	0.019633

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.686817	1	0.686817	14.31862	0.019369	7.708647
Within Groups	0.191867	4	0.047967			
Total	0.878683	5				

ตารางที่ ข.42 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 ชิ้นวุ้น เวลา 5 วัน กับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Column 1	3	18.87	6.29	0.0676
Column 2	3	22.073	7.357667	0.027176

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	1.709868	1	1.709868	36.08218	0.003866	7.708647
Within Groups	0.189553	4	0.047388			
Total	1.899421	5				

ตารางที่ ข.43 การวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดจากการปรับสภาพด้วยเชื้อรา 10 และ 20 ชิ้นวุ้น เวลา 5, 10, 20 และ 30 วัน

SUMMARY	5day	10day	20day	30day	Total
10p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	22.073	18.85	17.64	17.73	76.293
Average	7.357667	6.283333	5.88	5.91	6.35775
Variance	0.027176	0.108033	0.0091	0.0039	0.418064
20p					
Count	3	3	3	3	12
Sum	22.75	16.39	14.52	13.7	67.36
Average	7.583333	5.463333	4.84	4.566667	5.613333
Variance	0.100233	0.106233	0.0121	0.087033	1.582006
Total					
Count	6	6	6	6	
Sum	44.823	35.24	32.16	31.43	
Average	7.4705	5.873333	5.36	5.238333	
Variance	0.066241	0.287427	0.33296	0.577737	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	3.324937	1	3.324937	58.61377	9.76E-07	4.493998
Columns	19.00389	3	6.334629	111.6702	6.09E-11	3.238872
Interaction	2.089268	3	0.696423	12.27691	0.000202	3.238872
Within	0.907619	16	0.056726			
Total	25.32571	23				

ภาคผนวก ค

ภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

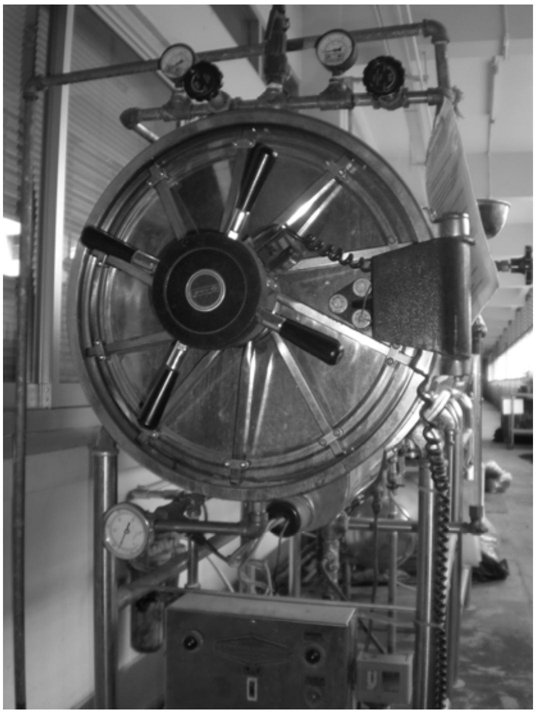
รูปที่ ค.1 เครื่องต้มเยื่อ

รูปที่ ค.2 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ

รูปที่ ค.3 เครื่องกระจายเยื่อ

รูปที่ ค.4 ตู้อบ

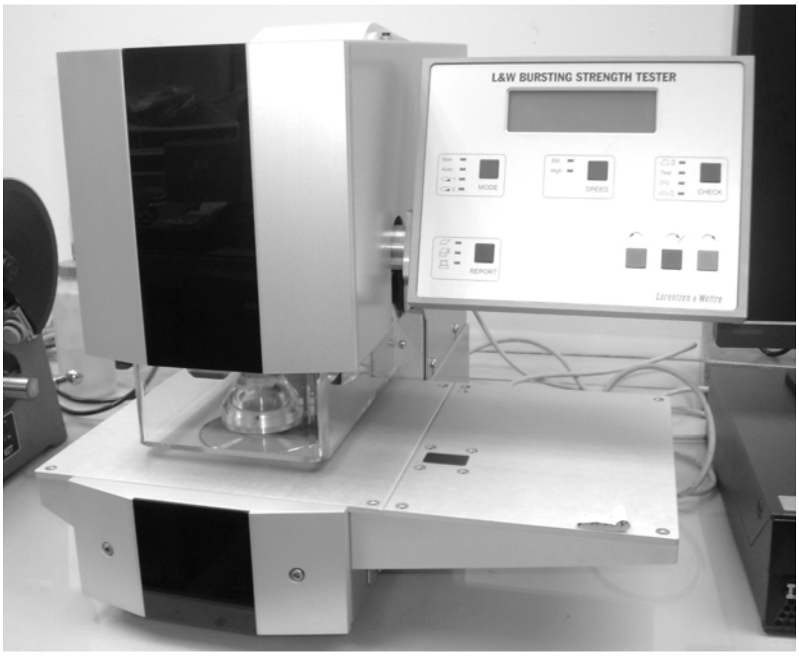
รูปที่ ค.5 เครื่องหาปริมาณความชื้น



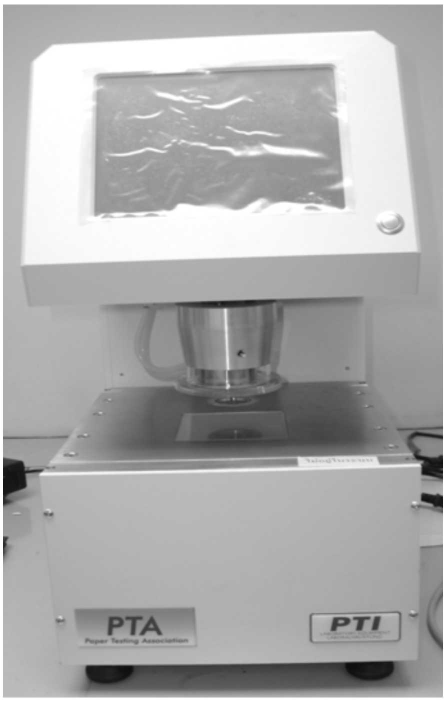
รูปที่ ค.6 หม้อนึ่งความดันไอ

รูปที่ ค.7 ตู้ถ่ายเชื้อ

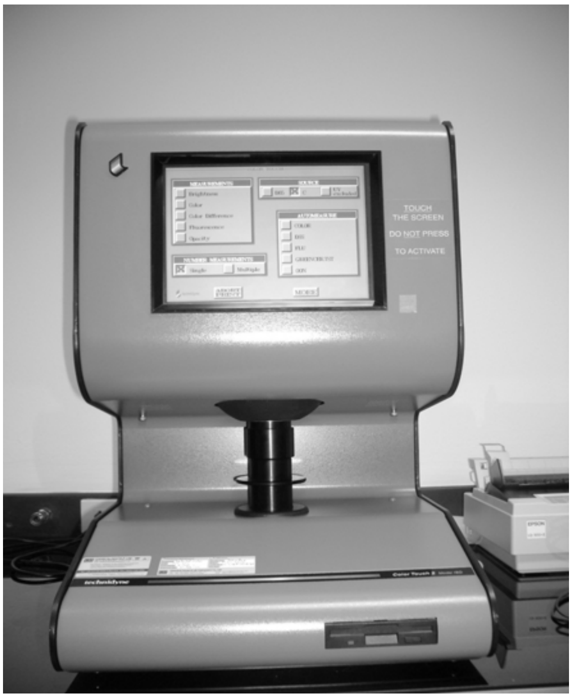
รูปที่ ค.8 เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง



รูปที่ ค.9 เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ



รูปที่ ค.10 เครื่องวัดค่าความพรุน



รูปที่ ค.11 เครื่องวัดค่าความขาวสว่างและความทึบแสง

รูปที่ ค.12 เครื่องวัดค่าความเรียบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวฐิตารินีย์ สุโรพันธ์ เกิดวันที่ 11 มกราคม 2524 ที่จังหวัดน่าน

ประวัติการศึกษา

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยาคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ (สำเร็จการศึกษา ปี 2546)

ผลงานทางวิชาการ

ฐิตารินีย์ สุโรพันธ์ สีหนาท ประสงค์สุข และ สมพร ชัยอารีย์กิจ. การปรับสภาพลำต้นข้าวโพดโดยใช้เชื้อรา *Phanerocaete chrysosporium* สำหรับการผลิตเยื่อแบบโซดา . การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกครั้งที่ 3 (พฤษภาคม 2010)