

ผลของไฟน์ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อไชดาญุคาลิปตัส

นางสาวแพรวพรรณศิริ มีพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF FINES ON PHYSICAL PROPERTIES OF PAPER FROM EUCALYPTUS  
SODA PULP

Miss Praewphansiri Meepong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของไฟนต้อสมบัติทางกายภาพของกระดาศจากเยื่อ ไซดาญคาลิปตัส
โดย	นางสาวแพรวพรรณสิริ มีพงษ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ)

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

แพรวพรรณสิริ มีพงษ์: ผลของไฟน์ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อไซดายูคาลิปตัส. (EFFECTS OF FINES ON PHYSICAL PROPERTIES OF PAPER FROM EUCALYPTUS SODA PULP) อ. ที่ปริกษานิพนธ์หลัก: อ.ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ, 105 หน้า.

สมบัติทางกายภาพของกระดาษนอกจากจะขึ้นกับกระบวนการผลิตและสารเคมีแล้ว อิทธิพลในส่วนของเส้นใยก็ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษเช่นกัน ไฟน์ (fines) เป็นเส้นใยหรือชิ้นส่วนของเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ไฟน์มีส่วนสำคัญต่อสมบัติด้านต่างๆ ของกระดาษ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของไฟน์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อคาลิปตัสที่ผ่านกระบวนการผลิตโดยวิธีไซดา โดยใช้ไฟน์และเยื่อคาลิปตัสทั้งแบบที่ผ่านและไม่ผ่านการฟอกเยื่อ โดยผสมไฟน์ชนิดฟอกและไม่ฟอกในปริมาณต่างๆ จนกระทั่งถึงร้อยละ 30 ลงในเยื่อทั้งชนิดฟอกและไม่ฟอก จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์ ค่าความยาวของเส้นใย ค่าความโค้งงอของเส้นใย ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใย และค่าความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง โดยค่าความโค้งงอและค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยในเยื่อฟอกมีค่าสูงกว่าเยื่อไม่ฟอก เยื่อและไฟน์ที่ไม่ผ่านการฟอกมีผลทำให้กระดาษมีค่าความทึบแสงสูง ในขณะที่ทำให้ค่าความขาวสว่างต่ำ ชนิดของเยื่อและไฟน์ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณไฟน์ ซึ่งหากมีปริมาณมากส่งผลให้ความหนาแน่นมากขึ้น ปริมาณไฟน์มีผลต่อค่าความเรียบของกระดาษ กล่าวคือ เมื่อปริมาณไฟน์เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระดาษมีค่าความเรียบสูงขึ้น ปริมาณไฟน์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกลดลง ส่วนค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไฟน์เพิ่มขึ้น หากแต่เมื่อปริมาณไฟน์มากกว่าร้อยละ 20 ค่าดัชนีความแข็งแรงดึงกลับลดลง อิทธิพลในส่วนของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษในปริมาณที่ต่างกันในแต่ละสมบัติของกระดาษ อย่างไรก็ตามปัจจัยในเรื่องของพันธะระหว่างเส้นใย และความแข็งแรงของเส้นใยก็มีความเกี่ยวข้องกับสมบัติของกระดาษเช่นกัน

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
ปีการศึกษา 2554 ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษานิพนธ์.....

# # 5272466223 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : FINES / FIBER / EUCALYPTUS / BLEACHING / PAPER PROPERTIES

PRAEWPHANSIRI MEEPONG: EFFECTS OF FINES ON PHYSICAL

PROPERTIES OF PAPER FROM EUCALYPTUS SODA PULP. ADVISOR:

KUNTINEE SUVARNAKICH, Ph.D., 105 pp.

Physical properties of paper not only depend on process and chemicals but the fiber also has a strong impact on physical properties of paper as well. Fines, defined as small fibers or fiber fragments that can pass through 200-mesh screen can have an impact on paper properties in various ways. In this research, the effects of fines on properties of paper made from bleached and unbleached Eucalyptus fines and pulps were examined by mixing bleached and unbleached fines in various dosages up to 30% with bleached and unbleached pulps. It was found that increased fines content led to decreased fiber length, curl index, kink index and fiber width. Bleached pulp provided higher curl and kink index than unbleached pulp. Paper which contained unbleached fines and/or pulp had high opacity but low brightness. Fines and pulp types did not have a strong impact on paper density as compared to fines content which higher fines content slightly offered denser paper. Fines content also affected paper smoothness because higher fines contents led to smoother paper. Tear index decreased with increasing amount of fines in paper; however, tensile index increased with higher percentage of fines but up to a certain point where the amount fines higher than 20% decreased tensile index. Influences of fines content, pulp types and fines types on physical properties of paper are quite different in each property. However, interfiber bonding and fiber strength are also important for and related to paper properties as well.

Field of Study : Pulp and Paper Technology

Student's Signature .....

Academic Year : 2011 .....

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่านอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ อาจารย์ซึ่งทำหน้าที่เสมือนกับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อีกคนหนึ่งท่าน ที่สละเวลาให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา หาวิธีการแก้ไข ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี และอาจารย์ ดร.นุชจรินทร์ เหลือง สะอาด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาสละเวลามาดำเนินการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทาง ภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเพื่อ สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์การทดลองระหว่างการทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านใน ภาควิชาฯ ที่คอยใส่ใจดูแลและอำนวยความสะดวกในทุกเรื่อง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ น้อง สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ให้มิตรภาพดีๆ คอยให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และให้กำลังใจตลอดระยะเวลา ดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้วางรากฐานชีวิตและ พื้นฐานทางความคิดที่ดี ได้ให้กำลังใจ ให้ความหวังใย และสนับสนุนด้านการเรียนการวิจัยเสมอ มา อันเป็นแนวทางไปสู่ความสำเร็จของผู้วิจัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	3
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1.1 องค์ประกอบของกระดาษ.....	5
2.1.1.1 องค์ประกอบที่เป็นเส้นใย.....	5
2.1.1.2 องค์ประกอบที่ไม่เป็นเส้นใย.....	6
2.1.2 กระบวนการผลิตกระดาษ.....	7
2.1.2.1 ส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น.....	8
2.1.2.2 ส่วนกตรีดน้ำ.....	9
2.1.2.3 ส่วนอบแห้งกระดาษ.....	9
2.1.2.4 ส่วนฉาบผิวกระดาษ.....	10

2.1.2.5 ส่วนรีดผิวกระดาษ.....	10
2.1.3 กระบวนการผลิตเยื่อ.....	11
2.1.3.1 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล.....	11
2.1.3.2 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี.....	12
2.1.3.3 กระบวนการผลิตเยื่อเคมี.....	13
2.1.4 การฟอกเยื่อ.....	14
2.1.4.1 วิธีการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อ.....	15
2.1.4.2 ระบบการฟอกเยื่อ.....	15
2.1.5 แหล่งที่มาของเส้นใยที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ.....	16
2.1.5.1 เส้นใยที่มาจากเนื้อไม้.....	17
2.1.5.2 เส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้.....	18
2.1.6 ยูคาลิปตัส.....	19
2.1.6.1 ความเป็นมาของไม้ยูคาลิปตัส.....	20
2.1.6.2 ประวัติการปลูกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทย.....	20
2.1.6.3 ลักษณะของไม้ยูคาลิปตัส ความลาดดูเลนซิส.....	21
2.1.6.4 การใช้ประโยชน์จากไม้ยูคาลิปตัส.....	22
2.1.7 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้.....	22
2.1.7.1 เซลลูโลส.....	22
2.1.7.2 เฮมิเซลลูโลส.....	24
2.1.7.3 ลิกนิน.....	26
2.1.7.4 สารแทรก.....	28
2.1.8 โครงสร้างของเส้นใย.....	29
2.1.8.1 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา.....	30
2.1.8.2 ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย.....	30
2.1.8.3 ลูเมน.....	31
2.1.9 ไฟน์.....	31
2.1.9.1 ไฟน์ของเยื่อเคมี.....	32
2.1.9.2 ไฟน์ของเยื่อเชิงกล.....	32
2.1.10 เครื่องคัดแยกขนาดเส้นใย (Bauer-McNett Classification).....	33



2.1.11 การบัดเยื่อ.....	35
2.1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเส้นใยกับสมบัติของกระดาษ.....	36
2.1.12.1 ความโค้งงอและการหักงอของเส้นใย.....	36
2.1.12.2 ความยาวของเส้นใย.....	36
2.1.12.3 ปริมาณไฟน์ (secondary fines).....	36
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	38
3.1.2 เครื่องมือ.....	38
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.2.1 การบัดเยื่อ.....	40
3.2.2 การวัดค่าสภาพระบายได้.....	41
3.2.3 การแยกไฟน์ออกจากเยื่อ.....	43
3.2.4 การผสมเส้นใยกับไฟน์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	44
3.2.5 การตีกระจายเยื่อ.....	45
3.2.6 การวัดลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (fiber morphology).....	46
3.2.7 การขึ้นแผ่นทดสอบ.....	47
3.2.8 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ.....	49
3.2.9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	55
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	57
4.1 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ.....	57
4.2 ความยาวของเส้นใย.....	59
4.3 ปริมาณไฟน์.....	60
4.4 ความโค้งงอของเส้นใย.....	62
4.5 ดัชนีการหักงอของเส้นใย.....	64
4.6 ความกว้างของเส้นใย.....	66

4.7 ความหนาแน่นปรากฏ.....	68
4.8 ความเรียบ.....	70
4.9 ความขาวสว่าง.....	72
4.10 ความทึบแสง.....	73
4.11 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	75
4.12 ดัชนีความต้านทานแรงฉีก.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	105

## สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
1-1	อัตราการใช้กระดาษของประชากรในประเทศไทย.....	1
2-1	องค์ประกอบทางเคมีของ hardwood และ softwood .....	22
2-2	การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของลิกนินในไม้.....	28
2-3	เบอร์ตะแกรง เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตะแกรง และขนาดช่องเปิดของ ตะแกรง.....	34
3-1	แสดงอัตราส่วนการผสมไฟน์กับเยื่อ.....	44
3-2	สัณฐานวิทยาของเยื่อแต่ละชนิด.....	45
4-1	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าสภาพระบายได้.....	57
4-2	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความยาวเส้นใย (LWW)	59
4-3	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อปริมาณไฟน์.....	61
4-4	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความโค้งงอของเส้นใย...	63
4-5	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าดัชนีการหักงอของเส้นใย.	64
4-6	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความกว้างของเส้นใย....	66
4-7	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ....	68
4-8	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความเรียบ.....	70
4-9	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความขาวสว่าง.....	72
4-10	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความทึบแสง.....	74
4-11	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง...	75
4-12	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าดัชนีความต้านทานแรง ฉีก.....	77
4-13	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ ชนิดเยื่อ และปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวต่อสมบัติ ต่าง ๆ ของ เยื่อและกระดาษ.....	80

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	กระบวนการผลิตกระดาษในเครื่องผลิตกระดาษ.....	8
2-2	ชนิดของเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง.....	19
2-3	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	23
2-4	บริเวณส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานของเซลลูโลส.....	24
2-5	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส.....	24
2-6	โครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้ spruce.....	27
2-7	หน่วยโครงสร้างหลักของลิกนิน.....	27
2-8	ชั้นมิดเดิลลามেলা (M) และโครงสร้างของเส้นใย.....	29
2-9	โครงสร้างของเส้นใย.....	30
2-10	ลักษณะของไฟไนน์เยื่อเชิงกล.....	32
2-11	flake-like fines และ fibrillar fines.....	33
2-12	ส่วนประกอบของ เครื่องคัดขนาดเส้นใย (Bauer McNett classifier).....	34
3-1	เครื่องบดเยื่อ (valley beater).....	41
3-2	ส่วนประกอบภายในเครื่องบดเยื่อ (valley beater).....	41
3-3	เครื่องวัดสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness tester).....	42
3-4	เครื่องคัดขนาดเส้นใย (Bauer-McNett classifier).....	43
3-5	เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator).....	45
3-6	เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer : FQA).....	47
3-7	เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (Rapid-Kothen sheet former).....	48
3-8	ส่วนขึ้นแผ่นทดสอบ (sheet forming) ของเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ.....	48
3-9	ส่วนอบแห้ง (dryer) ของเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ.....	49
3-10	ลักษณะการตัดแผ่นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบสมบัติความแข็งแรงต่างๆ.....	50
3-11	เครื่องวัดความหนา (thickness tester).....	51
3-12	เครื่องวัดความเรียบของกระดาษ (smoothness tester).....	51
3-13	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ.....	52
3-14	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength tester).....	53

ภาพที่		หน้า
3-15	เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (elmendorf tearing resistance tester).....	54
3-16	สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน.....	56
4-1	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าสภาพพระบายได้.....	57
4-2	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าความยาวเส้นใยแบบ.....	60
4-3	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อปริมาณไฟน์.....	61
4-4	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าความโค้งงอของเส้นใย...	63
4-5	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าดัชนีการหักงอของเส้นใย	65
4-6	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อความกว้างของเส้นใย.....	67
4-7	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิด ที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ.....	68
4-8	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าความเรียบ.....	70
4-9	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าความขาวสว่าง.....	72
4-10	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าความทึบแสง.....	74
4-11	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	76
4-12	ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อ ที่มีต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก.....	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องมาจากภาคเกษตรกรรม เพราะใช้วัตถุดิบ คือ เยื่อไม้ ในฐานะที่เป็นอุตสาหกรรมต้นทาง ที่ส่งทอดเชื่อมโยงไปยังอุตสาหกรรมขั้นกลางและอุตสาหกรรมปลายทาง เนื่องจากสามารถนำเยื่อกระดาษมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ อุตสาหกรรมยิปซัมบอร์ดและเส้นใยเรยอนเพื่อใช้ในการผลิตสิ่งทอ จึงถือได้ว่า อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษมีความสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจและสังคมและมีความจำเป็นต่อการพัฒนาประเทศ

แนวโน้มของภาวะอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษประเทศไทยในปี 2554 มีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้น [1] และอัตราการการใช้กระดาษของประชากรในประเทศก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 อัตราการใช้กระดาษของประชากรในประเทศไทย (หน่วย: กิโลกรัม/คน/ปี) [2]

ปี	2546	2547	2548	2549	2550	2551	2552	2553
ปริมาณการใช้	42	47	50	54	57	61	65	70

จากความต้องการการใช้กระดาษที่เพิ่มสูงขึ้น พบว่า ในประเทศไทยมีการใช้กระดาษคราฟต์มากที่สุด โดยมีการใช้กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษแข็ง และกระดาษชำระรองลงมา โรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษจึงผลิตเยื่อและกระดาษให้เพียงพอต่อความต้องการกระดาษแต่ละประเภทที่สูงขึ้น ปัจจุบันการผลิตเยื่อและกระดาษในประเทศไทย วัตถุดิบที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เยื่อไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งถือได้ว่ามีต้นทุนที่ต่ำเมื่อเทียบกับการผลิตในภูมิภาคอื่นๆ เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมในการปลูกไม้โตเร็ว

กระดาษแต่ละประเภทที่ผลิตออกมามีความแตกต่างกันตามความเหมาะสมในการใช้งานสมบัติของกระดาษในแต่ละประเภท นอกจากนี้ขึ้นกับกระบวนการและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตแล้ว อิทธิพลในส่วนของคุณสมบัติของเส้นใย ได้แก่ ลักษณะของเส้นใย ขนาดของเส้นใย และพันธะระหว่างเส้นใย เป็นต้น ก็ส่งผลต่อสมบัติของกระดาษเช่นกัน ไฟน์ (fines) ซึ่งเป็นเส้นใยหรือชิ้นส่วนของเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช มีพื้นฐานวิทยาศาสตร์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างไปจากเส้นใย (fiber) โดยไฟน์มีปริมาณสารแทรกและลิกนินมากกว่าเส้นใย ซึ่งความ

แตกต่างกันเล็กน้อยส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษด้วย อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของไฟน์ต่อสมบัติของกระดาษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของความแข็งแรงของกระดาษน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของไฟน์ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อคุณภาพดีที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยศึกษาอิทธิพลของไฟน์ที่เตรียมได้จากเยื่อที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอกที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษที่เตรียมจากเยื่อที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของไฟน์ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษ

1.2.2 เปรียบเทียบผลของไฟน์จากเยื่อที่ผ่านและไม่ผ่านการฟอกต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาอิทธิพลของไฟน์จากไฟน์ชนิดที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอกเยื่อต่อสมบัติของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการฟอกเยื่อและไม่ผ่านการฟอกเยื่อ โดยชนิดเยื่อที่ใช้เป็นเยื่อคุณภาพดีเกรดทางการค้าที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธีโซดา โดยนำเยื่อมาบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อ (valley beater) ให้ได้ค่าสภาพระบายได้ (freeness) เท่ากับ  $350 \pm 30$  มิลลิลิตร เนื่องจากเป็นเป็นค่าที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับเยื่อใยสั้นในอุตสาหกรรมกระดาษ จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณไฟน์ในเยื่อ นำเยื่อที่ผ่านการบดแล้วมาทำการคัดแยกไฟน์ ซึ่งเป็นส่วนที่ผ่านตะแกรง 200 เมช ออกจากเยื่อ โดยใช้เครื่องคัดแยกขนาดของเส้นใย (Bauer-McNett fiber classifier) ทำให้ได้ไฟน์ 2 ชนิด คือ ไฟน์จากเยื่อไม่ฟอกและไฟน์จากเยื่อฟอก และได้เยื่อ 2 ชนิดที่คัดแยกเอาไฟน์ออกแล้ว คือ เยื่อไม่ฟอกและเยื่อฟอก จากนั้นนำไฟน์และเยื่อกลับมาผสมกัน ทำให้ได้เยื่อผสมสำหรับนำไปผลิตเป็นแผ่นกระดาษ 4 กลุ่ม คือ ไฟน์จากเยื่อไม่ฟอกผสมกับเยื่อไม่ฟอก ไฟน์จากเยื่อไม่ฟอกผสมกับเยื่อฟอก ไฟน์จากเยื่อฟอกผสมกับเยื่อฟอก และไฟน์จากเยื่อฟอกผสมกับเยื่อไม่ฟอก โดยใส่ไฟน์ในอัตราส่วนต่างๆ คือ ร้อยละ 5, 10, 20 และ 30 รวมถึงใส่ไฟน์ไม่ฟอกและไฟน์ฟอกปริมาณร้อยละ 7.8 ลงในเยื่อไม่ฟอก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่หาได้จากการนำเยื่อไม่ฟอกทางการค้ามาทำการวิเคราะห์หาปริมาณของไฟน์ รวมถึงใส่ไฟน์ฟอกและไฟน์ไม่ฟอกปริมาณร้อยละ 8.8 ลงในเยื่อฟอก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่หาได้จากการนำเยื่อฟอกทางการค้ามาทำการวิเคราะห์หาปริมาณของไฟน์ นำเยื่อผสมที่เตรียมไว้ทั้ง 4 กลุ่มไปตีกระจายโดยใช้เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator) จากนั้นนำเยื่อผสมมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัม/ตารางเมตร นำแผ่นทดสอบไปทดสอบ

สมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาเพื่อนำค่าไปคำนวณความหนาแน่นปรากฏ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีก เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบหาอิทธิพลของไฟน์ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษ โดยพิจารณาผลจากชนิดของเยื่อ ชนิดของไฟน์ และปริมาณไฟน์ที่ใส่ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งทุกสภาวะการทดลอง นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

#### 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ศึกษาอิทธิพลของไฟน์จากไฟน์ที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก และเปรียบเทียบผลของไฟน์จากไฟน์ที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ได้จากเยื่อที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก โดยใช้เยื่อคุณภาพดีที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อโดยวิธีโซดา

#### 1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

ไฟน์เป็นเส้นใยหรือชิ้นส่วนของเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า 76 ไมโครเมตร (สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช) ในการคัดแยกขนาดเส้นใยเพื่อแยกไฟน์ออกมานั้น วัสดุที่ใช้ในการกักเก็บไฟน์ อาจกักเก็บไฟน์ไม่ได้หมด อาจมีบางส่วนที่เป็นส่วนน้อยที่สามารถหลุดลอดออกไปได้

#### 1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

ไฟน์ เป็นเส้นใยหรือชิ้นส่วนของเส้นใย ที่สามารถลอดผ่านตะแกรงของเครื่องคัดขนาดเส้นใย (Bauer- McNett classifier) ขนาด 200 เมช ซึ่งมีขนาดรูเปิด 76 ไมโครเมตร ได้

การผลิตกระดาษ เป็นการนำเยื่อกระดาษไปผสมกับน้ำให้มีความเจือจางของน้ำเยื่อที่เหมาะสม กวนให้เยื่อกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แล้วนำเยื่อกระดาษมาทำให้เป็นแผ่นโดยการเทน้ำเยื่อผ่านตะแกรงลวด เยื่อจะจับตัวกันและทับกันเป็นชั้น เมื่อกระดาษแห้งตัวเส้นใยจะเกิดแรงยึดระหว่างเส้นใย ทำให้เกิดเป็นแผ่นกระดาษ

ค่าสภาพระบายได้ (freeness) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการระบายน้ำออกของเส้นใย หรือการอุ้มน้ำของเส้นใย มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร เช่น ค่าสภาพระบายได้มีค่าต่ำ หมายความว่าเส้นใยนั้นสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มาก การระบายน้ำของเยื่อจึงช้า



ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) เป็นค่าแรงสูงสุดที่กระดาษจะทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง ต่อน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ

ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) เป็นการวัดแรงเฉลี่ยของกระดาษที่ต้านแรงในการฉีกแผ่นกระดาษต่อจากแนวตัดเริ่มต้น ต่อน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลอิทธิพลของไฟน์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อคุณภาพดีที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา

## 1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.8.2 ศึกษาวิธีการทดลอง เตรียมวิธีการทดลอง วัสดุอุปกรณ์การทดลอง

1.8.3 วางแผนการทดลองและทำการทดลองตามขั้นตอน ดังนี้

1.8.3.1 บดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้ตามแผนการทดลอง

1.8.3.2 คัดแยกขนาดเส้นใย เพื่อแยกไฟน์ออกมาจากเยื่อที่ใช้ในการทดลอง

1.8.3.3 ผสมเยื่อกับไฟน์ที่แยกออกมาได้ ในปริมาณต่างๆ ตามแผนการทดลอง

1.8.3.4 ขึ้นแผ่นทดสอบ จากเยื่อที่ผสมไฟน์ในปริมาณต่างๆ แล้ว

1.8.3.5 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษ

1.8.4 ทำการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะ

1.8.5 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง

1.8.6 เรียบเรียงเนื้อหา เขียนบทความทางวิชาการ เพื่อเผยแพร่ในวารสารวิชาการ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ในการเสนอผลการวิจัยมีการรายงานผลชนิดของเยื่อ ชนิดของไฟน์ และปริมาณไฟน์ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อคุณภาพดีที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปัจจุบันการบริโภคกระดาษประเภทต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง กระดาษแต่ละประเภทมีสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน สมบัติของกระดาษนอกจากขึ้นกับกระบวนการและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตแล้ว อิทธิพลในส่วนของเส้นใย ได้แก่ ลักษณะของเส้นใย ขนาดของเส้นใย และพันธะระหว่างเส้นใย ก็ส่งผลต่อสมบัติของกระดาษด้วยเช่นกัน

ไฟน์ (fines) คือ เส้นใยหรือชิ้นส่วนของเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช [3, 4] มีพื้นฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างไปจากเส้นใย (fiber) โดยไฟน์มีปริมาณสารแทรกและลิกนินมากกว่าเส้นใย [5]

เส้นใย เป็นเซลล์ที่มีผนังหนา ลักษณะเป็นแท่งที่มีความเรียวยาว ปลายเซลล์ทั้งสองข้างสอบปิดเข้าหากัน เส้นใยโดยทั่วไปที่อยู่ในเนื้อไม้ นั้นสามารถแยกย่อยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ด้วยกระบวนการผลิตเยื่อ (pulping) โดยผลผลิตสุดท้ายของการผลิตเยื่อจะได้เยื่อกระดาษ (paper pulp)

##### 2.1.1 องค์ประกอบของกระดาษ

กระดาษ เป็นแผ่นวัสดุบางๆ โครงร่างเป็นชั้นของเส้นใยจากพืชที่สานกันอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยการประสานของเส้นใยเกิดจากเส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมต่อกัน [6]

องค์ประกอบของกระดาษสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

##### 2.1.1.1 องค์ประกอบที่เป็นเส้นใย (fibrous raw material)

กระดาษสามารถยึดตัวเป็นแผ่นได้ โดยเกิดจากเส้นใยเป็นจำนวนมาก สานกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เส้นใยดังกล่าวโดยทั่วไปจะใช้เส้นใยธรรมชาติจากพืช ซึ่งเป็นตัวหลักในการผลิตกระดาษ โดยเส้นใยจะได้อาจมาจากเนื้อไม้ชนิดต่างๆ เช่น ไม้เนื้ออ่อน (softwood) ได้แก่ พืชตระกูลสน ซึ่งมีเส้นใยยาวจึงช่วยให้กระดาษมีความแข็งแรงและเหนียว และไม้เนื้อแข็ง (hardwood) ได้แก่ พืชตระกูลไม้ผลัดใบ ซึ่งมีเส้นใยที่สั้นกว่าจึงช่วยทำให้ผิวกระดาษเรียบและทึบ

แสงมากขึ้น โดยทั่วไปกระดาษจะมีส่วนของเส้นใยอยู่ในปริมาณร้อยละ 70-95 ของน้ำหนักกระดาษ ปริมาณส่วนของเส้นใยนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ต้องการผลิต [7]

### 2.1.1.2 องค์ประกอบที่ไม่เป็นเส้นใย (non-fibrous raw material)

องค์ประกอบที่ไม่ใช่เส้นใยจะเป็นสารเคมีที่เติมเข้าไประหว่างการผลิตกระดาษ เพื่อช่วยให้กระดาษที่ได้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท [7, 8] คือ

#### 2.1.1.2.1 สารเติมแต่งหลัก (functional additive)

สารเติมแต่งประเภทนี้มีหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะอย่างของกระดาษ เช่น สารด้านการซึมน้ำ (sizing agent) ใช้เติมลงในน้ำเยื่อเพื่อช่วยลดการซึมของเหลวเข้าไปในเนื้อกระดาษ โดยสารด้านการซึมน้ำจะไปช่วยลดพื้นที่ผิวของการดึงดูดระหว่างเส้นใยและโมเลกุลของน้ำ ทำให้ลดอัตราการซึมน้ำเข้าสู่กระดาษ สารตัวเติม (filler) สารเติมแต่งตัวนี้เป็นผงแร่สีขาว ใส่เพื่อเพิ่มสมบัติด้านทัศนศาสตร์และปรับปรุงสมบัติด้านการพิมพ์ของกระดาษ ช่วยให้กระดาษมีความเรียบขึ้น ทึบแสงมากขึ้น รับหมึกดีขึ้น ลดการซึมผ่านของหมึกพิมพ์ และทำให้น้ำหนักกระดาษมากขึ้น เป็นการลดต้นทุนในการใช้เยื่อกระดาษ เพราะตัวเติมจะมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเส้นใย ตัวเติมที่ดีควรมีขนาดประมาณ 1-10 ไมครอน ผงแร่ที่ใช้เป็นตัวเติมในกระดาษ ได้แก่ ดินขาว (kaolin clay) ไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide,  $TiO_2$ ) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate,  $CaCO_3$ ) เป็นต้น สารเพิ่มความเหนียว (dry strength agent) เป็นสารเคมี ใส่เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษ โดยเฉพาะความแข็งแรงตึง (tensile strength) และความต้านแรงดันทะลุ (burst strength) ช่วยลดการหลุดลอกของเส้นใยที่ผิวกระดาษ และเพิ่มพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นกระดาษ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นต่ำจะทำให้เกิดการแยกชั้นของกระดาษในระหว่างการพิมพ์ได้ สารเพิ่มความเหนียวที่ใช้ ได้แก่ แป้งธรรมชาติ (native starch) แป้งปรุงแต่ง (modified starch) ปรับให้เป็นประจุบวก และพอลิอะคริลาไมด์ (polyacrylamide) แป้งเป็นสารเพิ่มความเหนียวที่รู้จักกันดีและมีใช้มานานแล้ว แต่ในปัจจุบันนิยมใช้แป้งประจุบวกและพอลิอะคริลาไมด์มากกว่า เนื่องจากสารเหล่านี้มีประจุบวกจึงสามารถจับกันได้ดีกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบ ทำให้เพิ่มพันธะระหว่างเส้นใยในกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สารเพิ่มความเหนียวเมื่อเปียก (wet strength agent) เติมเพื่อรักษาความเหนียวของกระดาษเมื่อเปียกให้คงไว้ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 ของความเหนียวเดิม ใช้ในกระดาษพิมพ์งานพิเศษที่ต้องการความเหนียวเมื่อเปียกสูง ได้แก่ กระดาษพิมพ์แผนที่ กระดาษ

ธนบัตร เป็นต้น สารสีย้อม (dye) ใส่เพื่อรักษาโทนสีของกระดาษให้คงที่และชดเชยกับสีของลิกนิน ซึ่งมีสีเหลือง สารสีย้อมยังใช้แต่งสีกระดาษขาวให้ได้ระดับสีที่ต้องการหรือเพื่อให้ดูขาวขึ้น ซึ่งเรียกว่าสีแต่ง (tinting dye) โดยใช้สีแต่งในปริมาณน้อยๆ เติมในส่วนผสมของน้ำเยื่อ สีที่ใช้แต่งอาจเป็นสีใดก็ได้ แต่ในกระดาษขาวจะใช้สีม่วงหรือสีน้ำเงิน สารฟอกกนวล (optical brightening agent, OBA) เป็นสารสีย้อมประเภทเรืองแสง (fluorescent dye) เติมลงไปเพื่อช่วยให้กระดาษมีความขาวสว่างเพิ่มมากขึ้น

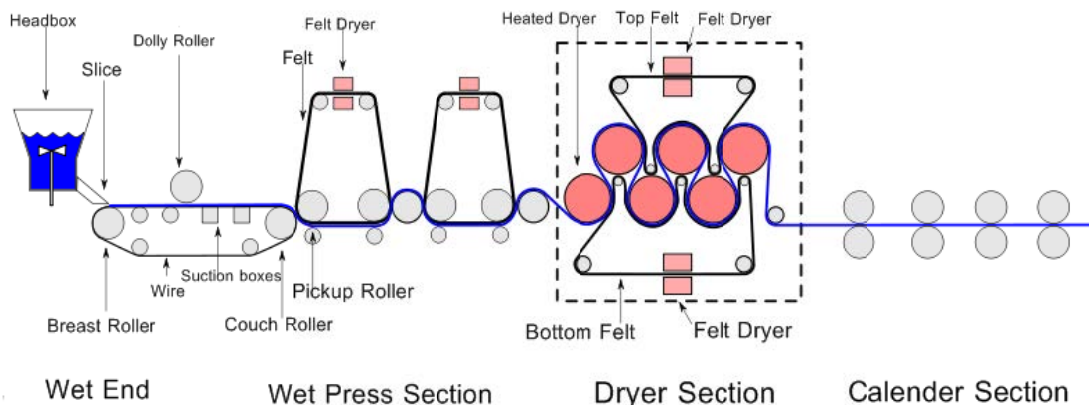
#### 2.1.1.2.2 สารเติมแต่งเสริม (chemical processing aids)

นอกจากทำหน้าที่ช่วยเสริมให้สารเติมแต่งหลักทำหน้าที่เฉพาะได้ดีแล้ว ยังสามารถช่วยในการบำรุงรักษาความสะอาดของเครื่องจักรผลิตกระดาษ ทำให้สามารถเดินกระดาษได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพสูงสุด สารในกลุ่มนี้ได้แก่ สารเพิ่มการตกค้าง (retention aid) สารนี้ช่วยให้มีการตกค้างของเส้นใยและตัวเติมในเยื่อกระดาษมากขึ้นในช่วงการระบายน้ำในส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น (wire section) สารต้านการเกิดฟอง (defoamer) สารนี้ช่วยป้องกันการเกิดฟองและช่วยให้การฟอร์มเป็นแผ่นกระดาษมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยให้น้ำแยกตัวออกจากเยื่อได้เร็วขึ้น สารควบคุมจุลชีวะ (microbiological control agent หรือ biocide) สารชนิดนี้ช่วยควบคุมการเกิดเมือก (slime) และการเจริญเติบโตของจุลชีวะจำพวกเชื้อราและแบคทีเรียในระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระดาษสกปรก ทำให้กระดาษขาดในระหว่างการผลิตได้ง่าย สารช่วยกระจายตัว (formation aid) สารชนิดนี้ช่วยให้เส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอ ลดการจับกลุ่มก้อนของเส้นใยในแผ่นกระดาษ

#### 2.1.2 กระบวนการผลิตกระดาษ

เมื่อทำการผลิตเยื่อ (pulping) และเตรียมน้ำเยื่อ (stock preparation) เรียบร้อยแล้ว น้ำเยื่อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องจักรผลิตกระดาษ เพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่อง [8] ภาพที่ 2-1 แสดงกระบวนการผลิตกระดาษในเครื่องผลิตกระดาษ

ถังจ่ายเยื่อ (headbox) เป็นอุปกรณ์ชิ้นแรกของเครื่องจักรผลิตกระดาษ ทำหน้าที่จ่ายน้ำเยื่อเข้าสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น ทำลายกลุ่มเส้นใย (floculated fiber) ในน้ำเยื่อและปล่อยให้เยื่อลงบนตะแกรงลวดเดินแผ่นอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของเครื่องจักร [8]



ภาพที่ 2-1 กระบวนการผลิตกระดาษในเครื่องผลิตกระดาษ [9]

### 2.1.2.1 ส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น (wire section หรือ forming section)

ทำหน้าที่สำคัญ คือ ก่อตัวเป็นแผ่นกระดาษด้วยกระบวนการกรองและการแยกน้ำออก (dewatering) แผ่นเปียกที่ออกจากส่วนนี้จะมีน้ำอยู่ร้อยละ 80 ตะแกรงลวดเดินแผ่นเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของเส้นใยในเนื้อกระดาษ น้ำเยื่อจากถังจ่ายเยื่อกระทบตะแกรงลวดเดินแผ่น (forming board) โดยความเร็วของน้ำเยื่อจะสูงหรือต่ำกว่าความเร็วของตะแกรงลวดเดินแผ่นเล็กน้อย เพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความสม่ำเสมอของเส้นใยในเนื้อกระดาษ ความแตกต่างของความเร็วน้ำเยื่อ ตะแกรงลวดเดินแผ่น และตำแหน่งที่น้ำเยื่อตกบนตะแกรงลวดเดินแผ่น เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของกระดาษอย่างมาก โดย Efflux ratio เป็นอัตราส่วนของความเร็วน้ำเยื่อหารด้วยความเร็วของตะแกรงลวดเดินแผ่น ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1

เมื่อน้ำเยื่อผ่านมาบนตะแกรง น้ำบางส่วนของน้ำเยื่อรวมทั้งเส้นใยและสารเติมแต่งที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของช่องตะแกรง จะไหลผ่านตะแกรงออกไปโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลกและแรงดูดจากอุปกรณ์เสริมอื่นๆ ที่ติดตั้งอยู่ใต้ตะแกรง น้ำที่หายไปมีผลทำให้เส้นใยเซลล์ulos อยู่ใกล้ชิดกันและเกี่ยวประสานสร้างพันธะกันได้มากขึ้น จนเกิดลักษณะเป็นแผ่นกระดาษ ซึ่งแผ่นกระดาษที่ได้จะมีผิวหน้าสองด้านที่แตกต่างกัน โดยด้านของแผ่นกระดาษที่สัมผัสตะแกรงเรียกว่า ด้านตะแกรง (wire side) ส่วนด้านของแผ่นกระดาษที่อยู่ตรงข้ามด้านตะแกรงเรียกว่า ด้านสักหลาด (felt side) ซึ่งเป็นด้านที่สัมผัสกับผืนสักหลาดที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านสายของแผ่นกระดาษบนเครื่องผลิตกระดาษ ปริมาณน้ำที่อยู่ในแผ่นกระดาษหลังการแยกน้ำออกแล้วมีอยู่ประมาณร้อยละ 80-85 โดยน้ำหนัก

### 2.1.2.2 ส่วนกดรีดน้ำ (pressing section)

สายของแผ่นกระดาษที่เกิดขึ้นหลังจากการแยกน้ำแล้ว จะเคลื่อนที่เข้าไประหว่างลูกกลิ้งกดรีดน้ำ (press rolls) เพื่อขจัดน้ำออกจากแผ่นกระดาษให้ได้มากที่สุดก่อนที่จะส่งต่อไปยังหน่วยทำแห้ง ปริมาณน้ำที่ยังมีอยู่ในแผ่นกระดาษเปียกหลังจากการกดรีดน้ำแล้วเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก ในส่วนกดรีดน้ำนี้จะมีการจัดเรียงของชุดกดรีดน้ำหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ผลิต สำหรับกระดาษพิมพ์เขียนซึ่งต้องการให้ผิวสองด้านของกระดาษเรียบเท่าๆ กัน ผิวทั้งสองด้านของกระดาษต้องถูกกดด้วยผิวลูกกลิ้งรีดน้ำที่เรียบโดยไม่มีผ้าสักหลาด แต่การกดรีดน้ำโดยไม่มีผ้าสักหลาดรองรับ จะทำให้น้ำระบายออกจากกระดาษได้ยาก การระบายน้ำไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมักมีผ้าสักหลาดหนึ่งหรือสองผืนเสมอในบรรดาลูกกลิ้งรีดน้ำทั้งหมดจะมีอยู่หนึ่งลูกที่เป็นแบบลูกกลิ้งรีดน้ำสุญญากาศ หรือลูกกลิ้งรีดน้ำที่มีผิวเป็นช่อง เพื่อให้น้ำระบายออกจากกระดาษได้มากขึ้น นอกจากการกดรีดน้ำออกแล้ว ลูกกลิ้งกดรีดน้ำยังมีหน้าที่คล้ายกับลูกกลิ้งแดนดี (dandy roll) คือ ช่วยกดอัดให้เส้นใยเซลลูโลสมาอยู่ใกล้กันและเกิดพันธะเคมีต่อกันได้มากยิ่งขึ้น ทำให้แผ่นกระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยเพิ่มความเรียบให้กับผิวกระดาษด้วย

### 2.1.2.3 ส่วนอบแห้งกระดาษ (drying section)

การทำแห้งกระดาษทำโดยอาศัยความร้อนจากไอน้ำอ้อมตัวความดันต่ำที่ถูกจ่ายเข้าไปข้างในลูกอบแห้ง ทำให้ผิวลูกอบแห้งร้อนขึ้น แล้วกลั่นตัวเป็นน้ำ (condensate) โดย condensate จะฟอร์มตัวเป็นฟิล์มอยู่ที่ผิวด้านในของลูกอบแห้ง ฟิล์มนี้ต้องไม่หนาจนเกินไป เพราะจะทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างไอน้ำและผิวลูกอบแห้งไม่ดี การระบาย condensate ออกจากลูกอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการอบแห้งกระดาษรวมถึงค่าใช้จ่ายด้วย ซึ่งความร้อนทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ในแผ่นกระดาษเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 2-8 โดยน้ำหนัก ในหน่วยอบแห้งนี้อาจมีการเคลือบสารเพิ่มความแข็งแรงผิวหน้าให้กับกระดาษ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสายของแผ่นกระดาษเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในหน่วยเคลือบสารเพิ่มความแข็งแรงผิวหน้า ซึ่งอยู่ก่อนส่วนทำแห้งส่วนสุดท้ายของหน่วยอบแห้ง เมื่อสารเพิ่มความแข็งแรงผิวหน้าถูกเคลือบบนกระดาษแล้วสายของกระดาษก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนทำแห้งส่วนสุดท้าย ทำให้สารเพิ่มความแข็งแรงบนผิวหน้ากระดาษเกิดการแห้งตัวก่อนที่สายของแผ่นกระดาษจะเคลื่อนเข้าสู่ขั้นต่อไป

#### 2.1.2.4 ส่วนฉาบผิวกระดาษ (size-press section)

เป็นการฉาบผิวกระดาษ (surface sizing) โดยกระดาษที่ผ่านการอบแห้งชุดแรกจะถูกฉาบด้วยน้ำแป้งที่ต้มสุก ซึ่งอาจมีการเติมสารบางอย่างลงในน้ำแป้งด้วย เช่น สารฟอกขาว เป็นต้น โดยน้ำแป้งจะฉาบอยู่ที่ผิวของกระดาษทั้ง 2 ข้าง ทำให้ผิวกระดาษแข็งแรงขึ้นและกระดาษมีความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นเพราะน้ำแป้งจะไปอุดรูที่ผิวกระดาษ ถัดจากเครื่องฉาบผิวจะเป็นส่วนให้ความร้อนแบบลมร้อน (air foil) และส่วนอบแห้งชุดหลังเพื่อให้กระดาษแห้ง

#### 2.1.2.5 ส่วนรีดผิวกระดาษ (calendering section)

เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ถัดจากส่วนอบแห้งชุดหลัง ประกอบด้วยลูกรีดทรงกระบอกซึ่งทำจากโลหะวางซ้อนกัน ผิวของลูกรีดจะแข็งและเรียบมาก กระดาษจะถูกดึงผ่านระหว่างลูกรีด ทำให้กระดาษบางลง เรียบขึ้น และมีความหนาสม่ำเสมอตลอดหน้ากว้างของกระดาษ การรีดผิวกระดาษนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่สายของแผ่นกระดาษจะเข้าม้วน แล้วถูกนำออกจากเครื่องผลิตกระดาษ เพื่อนำไปตัดเป็นม้วนขนาดเล็กหรือเป็นแผ่น

กระดาษที่ผลิตเสร็จแล้วอาจมีการปรับปรุงคุณภาพของผิวกระดาษให้มีความเรียบเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความความสามารถในการพิมพ์และมีความแข็งแรงขึ้น ได้แก่ การเคลือบผิวกระดาษ (coating) และการขัดผิวกระดาษ (supercalendering) เป็นต้น โดยการเคลือบผิวกระดาษทำให้กระดาษมีผิวหน้าที่เรียบขึ้น สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษดีขึ้น ซึ่งการเคลือบอาจเป็นแบบเคลือบด้านเดียวหรือเคลือบสองด้านของกระดาษ และอาจเคลือบด้านหรือเคลือบมันก็ได้ ทั้งนี้การเคลือบด้านหรือเคลือบมันนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่ใช้ โดยทั่วไปแล้วกระดาษที่ผ่านการรีดผิว และ/หรือ ผ่านการเคลือบผิวมาแล้ว กระดาษจะมีความเรียบและความมันวาวในระดับหนึ่ง การขัดผิวกระดาษนั้นจึงเป็นการเพิ่มความมันวาวของกระดาษให้มีมากยิ่งขึ้น โดยใช้อุปกรณ์ซึ่งต่อแยกออกจากเครื่องผลิตกระดาษที่เรียกว่า ซุปเปอร์คาเลนเดอร์ (supercalender) อันประกอบด้วยลูกกลิ้งขัดผิวจำนวนมากเรียงซ้อนกันในแนวตั้ง ลูกกลิ้งทำจากเหล็กกล้าขัดมันเรียงสลับกับลูกกลิ้งที่หุ้มด้วยฝ้าย เมื่อสายของแผ่นกระดาษผ่านเข้าไประหว่างลูกกลิ้ง แรงกดอัดระหว่างลูกกลิ้งที่กระดาษได้รับจะทำให้เส้นใยเซลลูโลสอัดตัวกันได้มากขึ้น เป็นผลทำให้ความมันวาวของกระดาษเพิ่มขึ้น

### 2.1.3 กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping process)

วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการผลิตเยื่อนั้นก็เพื่อต้องการแยกเส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (individual fiber) จากองค์ประกอบอื่นของไม้ โดยอาจมีการขจัดหรือไม่ขจัดลิกนินออกจากชิ้นไม้ก็ได้ เพื่อนำเยื่อที่ผลิตได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ [10, 11] โดยกระบวนการผลิตเยื่อเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อ แม้ว่าจะเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกัน หากแต่การผลิตเยื่อต่างกัน คุณสมบัติของเยื่อที่ได้ก็จะแตกต่างกัน และแม้ว่าจะใช้กระบวนการผลิตเดียวกัน แต่ถ้าสภาวะที่ใช้ในการผลิตแตกต่างกันก็จะส่งผลให้คุณสมบัติของเยื่อแตกต่างกันไปด้วย เยื่อโดยทั่วไปมีหลายชนิด การเรียกชื่อชนิดของเยื่อนั้นขึ้นอยู่กับกรรมวิธีผลิต ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบต่างๆ ของพลังงานที่ใช้ ได้แก่ พลังงานความร้อน พลังงานเคมี และพลังงานกล

กระบวนการผลิตเยื่อแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้ คือ

#### 2.1.3.1 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (mechanical pulping process)

เป็นกระบวนการที่ใช้แรงกลในการแยกเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยไม่มีการเอาลิกนินออก เยื่อเชิงกลจะให้ผลผลิตเยื่อ (pulp yield) ค่อนข้างสูง คือ มากกว่าร้อยละ 85 แต่คุณภาพของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อประเภทนี้ค่อนข้างต่ำ เยื่อมีเนื้อค่อนข้างหยาบกระด้าง เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่ไม่สมบูรณ์ มีการขาดและตัดเป็นท่อนๆ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลเมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาานจะกลับมามีสีเหลือง เนื่องจากลิกนินที่เหลืออยู่กระดาษจะทำปฏิกิริยากับแสง ความชื้น และความร้อนทำให้เกิดสีขึ้น [10, 12] กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลจะมีค่าความทึบแสงสูง เนื่องจากเส้นใยมีขนาดสั้น โดยทั่วไปเยื่อเชิงกลนิยมนำไปผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์ หรือใช้เป็นเยื่อชั้นในกระดาษแข็ง ปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลเพื่อให้คุณภาพของเยื่อสูงขึ้นโดยใช้ความร้อน ความดันและอาจใช้สารเคมีร่วมในกระบวนการผลิตด้วย เพื่อให้ลิกนินอ่อนตัวลง ง่ายต่อการทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน ลดพลังงาน และทำให้ได้เยื่อคุณภาพสูงขึ้น [10, 13, 14]

กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลสามารถแยกได้ดังนี้

##### 2.1.3.1.1 stone ground wood (SGW)

หลักการสำคัญของกระบวนการนี้คือ การบด (grinding) เป็นการนำท่อนไม้ที่ลอกเปลือกออกแล้วทั้งท่อนมาแยกเส้นใยด้วยหินบด (stone grinder) เยื่อที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จึงเรียกว่า stone ground wood pulp



### 2.1.3.1.2 refining mechanical pulping (RMP)

เป็นการใช้ท่อนไม้ที่ลอกเปลือกแล้วมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วแยกเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ด้วยเครื่องบดเยื่อแบบจานบด (disc refiner)

### 2.1.3.1.3 thermo mechanical pulping (TMP)

เป็นกระบวนการที่นำชิ้นไม้เล็กๆ มาผ่านไอน้ำที่ความดัน 20-40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เป็นเวลา 2-4 นาที เพื่อให้ลิกนินในชิ้นไม้อ่อนตัว ก่อนที่จะนำไปเข้าเครื่องบดเยื่อแบบจานบดเพื่อแยกเส้นใยออกมา

### 2.1.3.2 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี (semichemical pulping process)

เป็นการใช้วิธีการผลิตเยื่อเคมีร่วมกับการผลิตเยื่อเชิงกล โดยใช้พลังงานกล สารเคมี และพลังงานความร้อนร่วมกัน ซึ่งสารเคมีและความร้อนจะทำให้ชิ้นไม้มีการอ่อนตัวหรือละลายลิกนินที่เชื่อมระหว่างเส้นใยบางส่วนออก แล้วทำการแยกเส้นใยต่อโดยใช้แรงกล เยื่อที่ผลิตได้จากเยื่อเชิงกลกึ่งเคมีจะให้ผลผลิตเยื่อและคุณสมบัติของเยื่อที่ได้อยู่ระหว่างเยื่อแบบเคมีและแบบเชิงกล โดยผลผลิตเยื่อกึ่งเคมีมีค่าประมาณร้อยละ 55-90 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เส้นใยไม่มีความยืดหยุ่น (flexible) เท่ากับเยื่อเคมี แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าเยื่อเชิงกล ทำให้เส้นใยสร้างพันธะได้ดีกว่าจึงทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อเชิงกล เนื่องจากเยื่อเชิงกลกึ่งเคมีจะมีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่ จึงไม่นิยมนำมาฟอกเยื่อให้มีความขาวสว่างมาก เนื่องจากทำให้ขาวยากและสิ้นเปลืองสารเคมี [13-16]

กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมีสามารถแยกได้ดังนี้

#### 2.1.3.2.1 chemimechanical pulping (CMP)

เป็นการผลิตเยื่อโดยใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบ RMP และ TMP โดยให้สารเคมี อันได้แก่ โซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulfite) ทำปฏิกิริยากับไม้ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ระหว่างกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษหรือหลังกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ สำหรับในประเทศไทย เยื่อจากกระบวนการนี้จะใช้ในการผลิตกระดาษเพื่อใช้สำหรับหิ้วเจ้าหน้าที่ โดยใช้ไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบในการผลิต

### 2.1.3.2.2 chemi thermomechanical pulping (CTMP)

เป็นกระบวนการผลิตเยื่อโดยนำไม้มาทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟต์ร้อยละ 1-4 เพื่อให้ชิ้นไม้นุ่มขึ้น แล้วจึงนำชิ้นไม้ไปผลิตเป็นเยื่อกระดาษภายใต้ความดันต่อไป

### 2.1.3.2.3 neutral semichemical pulping (NSSC)

เป็นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยวิธีกึ่งเคมีซัลไฟต์ในภาวะที่เป็นกลาง ผลผลิตเยื่อที่ได้ประมาณร้อยละ 65-80 เยื่อที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่ใช้ทำกระดาษอัดและกระดาษย่น [2]

### 2.1.3.3 กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping process)

เป็นกระบวนการใช้สารเคมีละลายลิกนินที่เป็นตัวยึดให้เส้นใยเกาะกลุ่มกันภายในเนื้อไม้ออกมา เพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกัน อย่างไรก็ตามสารเคมีที่ใช้ไม่ได้ละลายเฉพาะลิกนินเท่านั้น หากแต่ละลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนด้วย ทำให้ผลผลิตเยื่อที่ได้ค่อนข้างต่ำ คือประมาณร้อยละ 40-50 เยื่อเคมีที่ผลิตได้สามารถนำไปทำการฟอกเยื่อต่อได้ง่าย เนื่องจากปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่น้อย เยื่อที่ผลิตได้มีโอกาสกลับมาเป็นสีเหลือง (yellowing and brightness reversion) ต่ำกว่าเยื่อที่ผลิตจากเยื่อเชิงกล [10, 12] กระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระบวนการนี้จะมีความแข็งแรงค่อนข้างสูง เนื่องจากความสมบูรณ์และความยาวของเส้นใยของเยื่อเคมีสูงกว่าของเยื่อเชิงกล [13-14]

กระบวนการผลิตเยื่อเคมีสามารถแบ่งได้ดังนี้

#### 2.1.3.3.1 กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบกรด (acidic pulping)

กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบกรดหรือเรียกว่ากระบวนการผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ (sulfite pulping) เนื่องจากใช้กรดซัลฟิวรัส (sulfurous acid,  $H_2SO_3$ ) และไฮไดรอนไบซัลไฟต์ (bisulfite ion,  $HSO_3^-$ ) เป็นสารต้มเยื่อในการทำละลายและละลายลิกนิน ข้อดีของการผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ คือ เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างสูง จึงง่ายต่อการนำไปฟอกเยื่อต่อ ให้ผลผลิตเยื่อในการฟอกเยื่อสูงและการบดเยื่อทำได้ง่าย [15]

### 2.1.3.3.2 กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบต่าง (alkaline pulping)

กระบวนการนี้เป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย ตัวอย่างของกระบวนการนี้ได้แก่ กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (soda pulping) กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา-แอนทราควิโนน (soda anthraquinone pulping) และ กระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ (kraft or sulfate pulping) เป็นต้น โดยกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดานั้น สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ซึ่งเป็นวิธีผลิตเยื่อแบบดั้งเดิม กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดานิยมใช้กับพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ (non wood plant) ส่วนกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา-แอนทราควิโนนนั้น สารเคมีที่ใช้ในการต้มยังคงเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หากแต่มีการใช้สารแอนทราควิโนนร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงาน ซึ่งแอนทราควิโนนเมื่อทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้ว จะทำให้ได้สัดส่วนของกลุ่มฟีนอลิกที่สูง เนื่องจากสารนี้จะไปทำลายในส่วนของพันธะระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต ทำให้การสลายลิกนินง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้ลิกนินเกิดปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารเคมีที่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ช่วยให้สมบัติเยื่อดีขึ้น สำหรับกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์นั้นพัฒนามาจากการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยมีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide, Na<sub>2</sub>S) ลงไปผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารต้มเยื่อ ทำให้เยื่อที่ผลิตได้มีความแข็งแรงสูง โดยการผลิตเยื่อแบบคราฟต์นี้สามารถใช้ผลิตเยื่อจากพืชได้หลายชนิด และสารเคมีที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก แต่กลิ่นของสารเคมีที่ปล่อยออกมาตอนต้มเยื่อยังเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ยาก [2, 12-15]

### 2.1.4 การฟอกเยื่อ (bleaching)

เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการผลิตอาจมีความขาวสว่างไม่สูงมาก จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในด้านความขาวสว่าง (brightness) ของเยื่อให้สูงขึ้น โดยไม่ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยต่ำลง และให้ความขาวสว่างอยู่คงสภาพโดยไม่มีการกลับสี (brightness reversion) ความขาวสว่างเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษทิชชู แต่ที่สำคัญต้นทุนของการฟอกเยื่อจะต้องต่ำด้วย คือ พยายามให้มีการสูญเสียเยื่อไปในการฟอกเยื่อให้น้อยที่สุด และควรเลือกสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อให้ได้คุณภาพตามต้องการโดยใช้สารเคมีต่อเยื่อที่ฟอกต่ำ [13, 17]

### 2.1.4.1 วิธีการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อ

#### 2.1.4.1.1 วิธีการเปลี่ยนลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (lignin bleaching approach)

เป็นวิธีการเปลี่ยนโครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์ (chromophoric group) ที่อยู่ในส่วนของลิกนิน เพื่อให้เยื่อไม่เกิดสีเหลืองเมื่อสัมผัสกับแสงแดดหรือความชื้น วิธีนี้ลิกนินไม่ได้ถูกกำจัดออก ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปเยื่ออาจกลับมาเหลืองได้อีกครั้งหนึ่ง วิธีนี้มักใช้กับเยื่อที่ให้ผลผลิตสูง เช่น เยื่อเชิงกลและเยื่อกึ่งเคมี เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่มีการเอาลิกนินออก ทำให้ผลผลิตของเยื่อหลังฟอกไม่ลดลงมาก และนิยมฟอกแบบขั้นตอนเดียว (single-stage bleaching) เยื่อที่ฟอกด้วยวิธีการนี้จะให้ความขาวสว่างเยื่อปานกลาง สารเคมีที่นิยมใช้ในการฟอกแบบนี้ คือ โซเดียมเปอร์ออกไซด์ (sodium peroxide,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) โซเดียมไดไทโอไนต์ (sodium dithionite,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) เป็นต้น [17, 18]

#### 2.1.4.1.2 วิธีการกำจัดลิกนิน (lignin removal approach)

เป็นวิธีการที่มีการเอาลิกนินออกจากเยื่อ (delignification) ด้วยสารเคมี ซึ่งให้ผลค่อนข้างถาวร ทำให้เยื่อมีความขาวสว่างค่อนข้างสูงและไม่ทำให้เยื่อที่ผ่านการฟอกแล้วกลับมามีสีเหลืองอีกเมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือแสงแดด วิธีนี้มักใช้กับเยื่อที่ผลผลิตต่ำ เช่น เยื่อเคมี โดยนิยมใช้กับการฟอกเยื่อแบบหลายขั้นตอน (multiple-stage bleaching) สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อแบบนี้ คือ ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) คลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) คลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide,  $\text{ClO}_2$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite,  $\text{NaOCl}$ ) โอโซน ( $\text{O}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) เป็นต้น [17, 18]

### 2.1.4.2 ระบบการฟอกเยื่อ

#### 2.1.4.2.1 การฟอกเยื่อแบบหลายขั้นตอน (multiple-stage bleaching)

ระบบการฟอกเยื่อด้วยสารเคมีแบบหลายขั้นตอน แบ่งได้เป็นระบบดั้งเดิม (conventional) ระบบ elementary chlorine free (ECF) และระบบ totally chlorine free (TCF) [13] โดยระบบดั้งเดิมเป็นระบบการฟอกที่ใช้ก๊าซคลอรีนในการฟอกเยื่อ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม ส่วนระบบ ECF เป็นระบบการฟอกที่สามารถใช้สารที่มีองค์ประกอบของ

คลอรีนได้ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ ส่วนระบบ TCF นั้นเป็นระบบการฟอกที่ไม่ใช้คลอรีนและสารที่มีองค์ประกอบของคลอรีนเลย เช่น ออกซิเจน โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

สำหรับการฟอกเยื่อแบบหลายขั้นตอน เช่น CEDED และ OZEP มีการกำหนดสัญลักษณ์ในการฟอกเยื่อโดยขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้คือ

C = ใช้สารคลอรีนในการฟอก

E = ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการฟอก

H = ใช้สารแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ในการฟอก

D = ใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ในการฟอก

P = ใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอก

O = ใช้สารออกซิเจนในการฟอก

Z = ใช้สารโอโซนในการฟอก

#### 2.1.4.2.2 การฟอกเยื่อแบบขั้นตอนเดียว (single-stage bleaching)

ส่วนมากการฟอกเยื่อโดยวิธีนี้ในประเทศไทยนิยมใช้ในการฟอกเยื่อสาและเยื่อปอ โดยเยื่อสาและเยื่อปอที่ผ่านการล้างแล้วจะนำมาฟอกขาวโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างเยื่อที่ฟอกอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นหากต้องการเยื่อสีต่างๆ ก็สามารถนำเยื่อไปย้อมสีต่อได้

#### 2.1.5 แหล่งที่มาของเส้นใยที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษส่วนใหญ่ได้มาจากเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช ทั้งที่เป็นไม้ยืนต้นและไม่ล้มลุก โดยแหล่งเส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่มาจากเนื้อไม้ แต่บางส่วนอาจไม่ได้มาจากเนื้อไม้ เช่น จากส่วนของใบ (leaf) ผล (fruit) หรือจากลำต้น (stem) ของพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ได้เช่นกัน ดังนั้นจึงอาจแบ่งเส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษออกเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้และเส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้

### 2.1.5.1 เส้นใยที่มาจากเนื้อไม้ (wood fiber)

เป็นเส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ (wood) ของพืชเมล็ดเปลือย (gymnosperm) ในกลุ่มของพวกไม้สน (conifers) และเนื้อไม้ของพืชดอก (angiosperms) ในกลุ่มของพวกพืชใบเลี้ยงคู่ (dicotyledons) ซึ่งไม้ยืนต้นทุกชนิดสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษได้ เส้นใยประเภทนี้ได้มาจากป่าธรรมชาติและบางชนิดก็สามารถปลูกเป็นสวนป่าเพื่อใช้ในการผลิตเยื่อโดยเฉพาะ โดยที่เนื้อไม้ คือ ส่วนของเนื้อเยื่อท่อลำเลียงน้ำ (xylem tissue) ซึ่งเกิดจากแคมเบียม (cambium) ที่พืชมีเนื้อไม้ (woody plant) สร้างขึ้นมาเป็นจำนวนมาก [19] ในทางอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษแบ่งประเภทเนื้อไม้ออกเป็น 2 ประเภทคือ

#### 2.1.5.1.1 ไม้เนื้ออ่อน (softwood)

เป็นไม้ในกลุ่มของพืชเมล็ดเปลือยในกลุ่มของพวกไม้สน หรืออาจเรียกว่าเป็นไม้ใบแคบหรือไม้ไม่ผลัดใบก็ได้ เป็นต้นไม้ที่ลักษณะใบเหมือนรูปเข็ม เขียวตลอดทั้งปี เป็นไม้ที่ไม่มีการผลิตใบ มีมากในแถบประเทศเขตหนาว เซลล์ที่พบในเนื้อไม้ในกลุ่มของไม้เนื้ออ่อนซึ่งเป็นพวกสนนั้น คือ เทรคีต (tracheid, fiber tracheid) เซลล์พาเรนไคมา (parenchyma cell) และเรซินเซลล์ (resin cell) โดยเตรคีตทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงน้ำภายในลำต้น เทรคีตจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 90-95 ของปริมาตรเนื้อไม้ ลักษณะของเตรคีตมีลักษณะเซลล์ค่อนข้างผอมยาว หัวท้ายมน เซลล์ไม่มีรูทงู เทรคีตเป็นวัตถุดิบที่รู้จักกันในคำว่า เยื่อ ในอุตสาหกรรมกระดาษ ส่วนเซลล์พาเรนไคมานั้นเป็นเซลล์ที่มีลักษณะเหมือนกล่องสี่เหลี่ยม โดยจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 และเรซินเซลล์จะมีอยู่ประมาณร้อยละ 0.5-1 ของปริมาตรเนื้อไม้ โดยทั่วไปแล้ว เส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3 มิลลิเมตร ตัวอย่างไม้ชนิดนี้ได้แก่ ไม้สนสองใบ ไม้สนสามใบ เป็นต้น เยื่อที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจะเรียกว่า เยื่อใยยาว และการเรียกชื่อทางการค้ามักมีอักษร N (Needle) นำหน้า เช่น NBKP (Needle Bleached Kraft Pulp) เพื่อระบุว่า เป็นเยื่อใยยาว เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจะมีลักษณะของโครงสร้างที่สม่ำเสมอ เซลล์ในเนื้อไม้โดยภาพรวมส่วนใหญ่จะมีลักษณะของเซลล์ยาว ตรง ทำให้ขั้นตอนหรือกระบวนการจัดการต่างๆ เกี่ยวกับเนื้อไม้ทำได้ง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยมักนำมาผลิตกระดาษที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ผิวของกระดาษที่ได้จะไม่เรียบ เนื้อกระดาษไม่สม่ำเสมอ และเส้นใยจะจับกันเป็นก้อน [2, 17, 19, 20] ภาพที่ 2-2 แสดงชนิดของเซลล์ในไม้เนื้ออ่อน

### 2.1.5.1.2 ไม้เนื้อแข็ง (hardwood)

เป็นเนื้อไม้ของพืชดอกในกลุ่มของพวกพืชใบเลี้ยงคู่ หรืออาจเรียกว่าเป็นไม้ใบกว้าง (broadleaves) หรือไม้ผลัดใบก็ได้ ตัวอย่างของไม้เนื้อแข็ง เช่น ต้นยูคาลิปตัส ต้นกระถินเทพา ต้นกระถินณรงค์ เป็นต้น ต้นไม้พวกนี้จะมีลักษณะใบกว้างและมีการผลัดใบในฤดูใบไม้ร่วง ในกลุ่มของไม้เนื้อแข็งจะพบเซลล์หลายชนิดมากกว่าในไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ เซลล์เวสเซล (vessel element) มีหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ ไม้เนื้อแข็งมีเวสเซลอยู่ร้อยละ 20-55 เซลล์ไฟเบอร์ (fiber cell) แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ไฟเบอร์เทรคีด (fiber tracheid) และลิบริฟอร์มไฟเบอร์ (libriform fiber) ซึ่งจะมีหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้น โดยมีอยู่ประมาณร้อยละ 36-70 เรย์เซลล์ (ray cell) มีอยู่ร้อยละ 6-20 และพาเรนไคมาเซลล์ (parenchyma cell) มีอยู่ร้อยละ 2 ของปริมาตรเนื้อไม้ โดยทั่วไปแล้วเส้นใยของไม้เนื้อแข็งจะมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1-2 มิลลิเมตร การเรียกชื่อทางการค้ามักมีอักษร L (Leaved) นำหน้า เช่น LBKP (Leaved Bleached Kraft Pulp) เพื่อระบุเชื้อว่ามาจากไม้ใบกว้าง กระดาษที่ผลิตได้จากไม้เนื้อแข็งมีความแข็งแรงต่ำกว่าไม้เนื้ออ่อน แต่จะมีความเรียบเนียนมากกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน โดยส่วนใหญ่ก็นำเส้นใยที่ได้จากไม้พวกนี้มาทำเป็นกระดาษที่ต้องการความเรียบ เช่น กระดาษพิมพ์เขียน เป็นต้น ภาพที่ 2-2 แสดงชนิดของเซลล์ในไม้เนื้อแข็ง

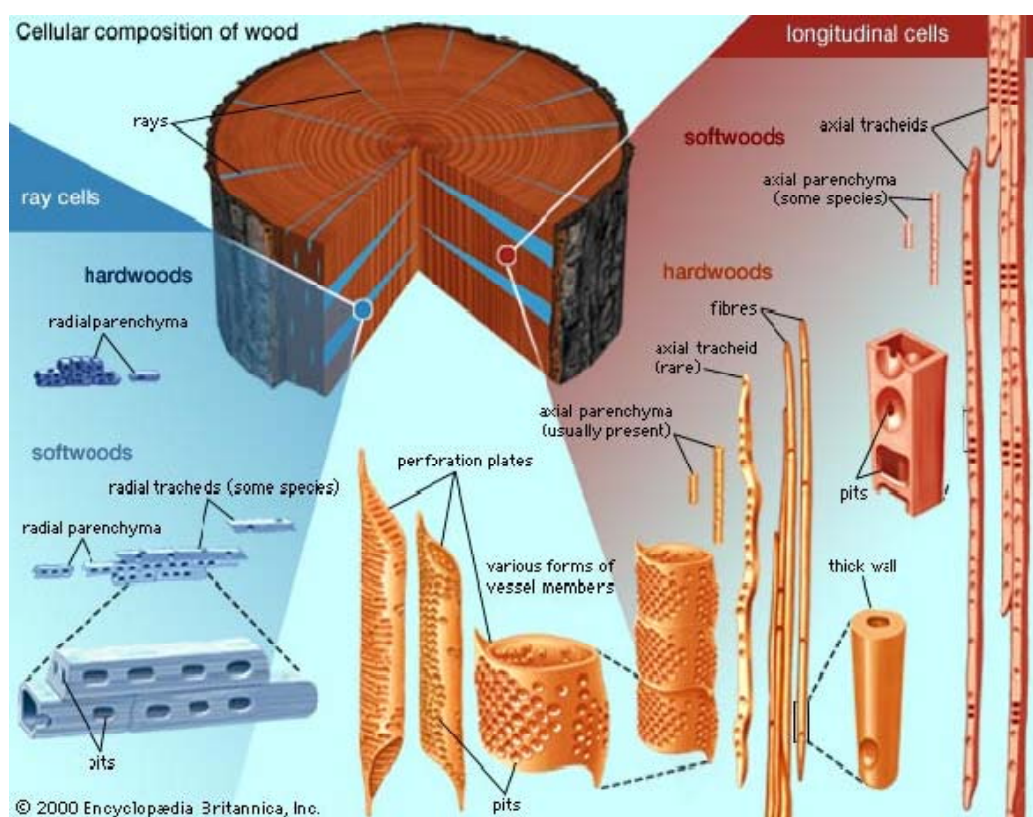
### 2.1.5.2 เส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้ (non-wood fiber)

พืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษที่สำคัญ ในหลายประเทศที่ปริมาณการผลิตเยื่อไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน ในอดีตการนำพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้มาทำการผลิตเยื่อไม่ค่อยมีความนิยมเหมือนพวกเนื้อไม้ เพราะการจัดการวัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงกระบวนการผลิตยังไม่ค่อยได้มีการพัฒนา ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อ การออกแบบเครื่องมือ และกระบวนการทางวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการผลิตเยื่อจากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เพิ่มมากขึ้น พืชเหล่านี้หลายชนิดสามารถผลิตกระดาษได้ดีและเท่าเทียมกับเยื่อจากไม้เนื้อแข็ง สำหรับพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ คือ

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

- พืชล้มลุกที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ ต้นไผ่ หญ้าต่างๆ เช่น ต้นกก ต้นอ้อ หญ้าขจรจบ เป็นต้น

- พืชเส้นใยต่างๆ (crop fiber ) ได้แก่ เส้นใยที่ได้จากส่วนเปลือกและลำต้น (bast or stem) เช่น ลิ้นจี่ ป่าน ปอกระเจา ปอแก้ว และปอกระสา ซึ่งเป็นประเภทเส้นใยสั้นอยู่ในส่วนแกนกลางของลำต้น เส้นใยประเภทนี้เมื่อผ่านกระบวนการต้มเยื่อมักจะแยกตัวออกในแนวแกนของเส้นใย เส้นใยที่ได้จากส่วนใบ (leaf fiber) เช่น สับปะรดและป่านศรนารายณ์ และเส้นใยที่ได้จากเมล็ด (seed fiber) เช่น ฝ้าย ทั้งที่เป็นฝ้ายและเมล็ดฝ้ายติดปุ๋ย ซึ่งจัดเป็นประเภทเส้นใยยาว มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูง ใช้ผลิตเยื่อชนิดพิเศษ เพราะให้คุณภาพของเยื่อที่ค่อนข้างสูง [2, 17]



ภาพที่ 2-2 ชนิดของเซลล์ในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [21]

### 2.1.6 ยูคาลิปตัส (eucalyptus)

ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษในประเทศไทยมากที่สุด [17, 22]



### 2.1.6.1 ความเป็นมาของไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัส เป็นพืชที่มีความหลากหลายมาก ซึ่งทั้งโลกมีมากกว่า 500 ชนิด (species) เป็นไม้ที่ขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีสีเขียวตลอดปี เป็นไม้พันธุ์พื้นเมืองในทวีปออสเตรเลียแผ่กระจายไปทั่วทวีป ขึ้นในทุกสภาพอากาศตั้งแต่เขตร้อนไปจนถึงเขตอบอุ่น ไม้ยูคาลิปตัสแต่ละชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป บางชนิดเนื้อไม้มีคุณค่า บางชนิดมีน้ำมันมาก สามารถสกัดไปใช้ประโยชน์ได้ บางชนิดลำต้นสวยงามเหมาะเป็นไม้ประดับ และที่สำคัญที่สุดคือ บางชนิดมีอัตราการเจริญเติบโตดี ต้นที่สูงที่สุดที่มีการบันทึกไว้คือ 99 เมตร ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่แห้งแล้งได้ ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส เป็นชนิดที่นิยมปลูกในประเทศต่างๆ รวมทั้งประเทศไทย เนื่องจากยูคาลิปตัสชนิดนี้สามารถปรับตัวเจริญเติบโตได้ดีในสภาพดินแทบทุกประเภท และนำมาใช้ประโยชน์โดยใช้เวลาในการปลูก 4-5 ปี ได้ผลเฉลี่ย 10-15 ตัน/ไร่ [23]

### 2.1.6.2 ประวัติการปลูกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทย

การปลูกยูคาลิปตัสในประเทศไทยเริ่มครั้งแรกในปี พ.ศ. 2493 ที่จังหวัดเชียงใหม่ ต่อมาในปี พ.ศ. 2508 โครงการสำรวจวัตถุดิบเพื่อใช้ทำเยื่อกระดาษได้สั่งเมล็ดยูคาลิปตัสจากประเทศออสเตรเลีย ปรากฏว่ายูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส สามารถรอดตายและเจริญเติบโตได้ดีที่สุด จึงกล่าวได้ว่ายูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส เริ่มปลูกครั้งแรกโดยปรากฏเป็นหลักฐานในปี พ.ศ. 2508 จากนั้นได้มีการคัดเลือกพันธุ์ คามาลดูเลนซิส อีกหลายครั้ง เพื่อเสาะหาพันธุ์มาปรับปรุงและขยายพันธุ์ให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น ในปี พ.ศ. 2521 ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส เริ่มได้รับความสนใจอย่างเด่นชัดจากกลุ่มนักวิชาการป่าไม้ของประเทศไทย สถานีทดลองปลูกพรรณไม้ห้วยทา จังหวัดศรีสะเกษ ได้เอาไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส มาปลูกเปรียบเทียบกับไม้โตเร็วสกุลอื่นๆ อีก 3 ชนิด คือ กระถินณรงค์ ไม้หนนทรี และกระถินยักษ์ ปรากฏว่าไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส ได้รับความสนใจในวงการป่าไม้ ทั้งๆ ที่การเจริญเติบโตในรูปแบบเนื้อไม้ทั้งหมดให้ปริมาณใกล้เคียงกับกระถินณรงค์และหนนทรี แต่เนื้อไม้ยูคาลิปตัสมีรูปทรงของลำต้นเปลาตรง กิ่งก้านน้อยและมีความสูงอย่างเด่นชัด ทำให้สะดวกและได้รับความสนใจมากกว่าไม้กระถินณรงค์และไม้หนนทรี

สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันนอกจากไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส ที่นิยมปลูกกันมากแล้ว ยูคาลิปตัส ดิกรูปต้า (E. deglupta) ก็มีการปลูกเช่นกัน แต่ยูคาลิปตัส ดิกรูปต้า จะเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่ค่อนข้างชื้นเท่านั้น และมีอัตราการเจริญเติบโตน้อยกว่ายูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส จึงได้รับความนิยมน้อยกว่ายูคาลิปตัสชนิดคามาลดูเลนซิส [23]

### 2.1.6.3 ลักษณะของไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส

ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส เป็นไม้ที่เจริญเติบโตได้ดีในบริเวณภูมิอากาศแถบอบอุ่น เขตร้อนจนถึงแถบกึ่งเขตร้อน โดยจะทนต่ออากาศร้อนจัดอุณหภูมิสูงสุด 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิมินาวัดต่ำสุดถึง -5 องศาเซลเซียส ระยะเวลาทนต่อความแห้งแล้ง 6-8 เดือน และทนต่อภาวะน้ำท่วมขัง 2-8 เดือน จะพบขึ้นในระดับความสูงกว่าระดับน้ำทะเล 0-600 เมตร ในท้องถิ่นที่มีปริมาณน้ำฝน 200-1250 มิลลิเมตร แต่ถ้าปลูกเพื่อการค้าควรปลูกในพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนไม่ต่ำกว่า 400 มิลลิเมตร ไม้ยูคาลิปตัสปรับตัวขึ้นได้ในดินเกือบทุกประเภท ทั้งดินเหนียว ดินร่วนปนทราย ดินลูกรัง ดินทราย ดินหินปูน ดินเค็ม โดยชอบดินที่มีความเป็นกรดต่างประมาณ 6.0-7.5 มีความโตทางเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.9-2.1 เมตร ถ้าขึ้นในที่โล่งแจ้งจะมีเรือนยอดแผ่บางเปิดกว้าง ลักษณะของใบเป็นรูปไข่เกือบเป็นรูปหอก กว้าง 2-4 เซนติเมตร ยาว 15-20 เซนติเมตร ใบอ่อนสีเขียวปนเทา ใบแก่เรียงแบบสลับกัน มีก้านใบยาว ลักษณะใบเป็นรูปหอก ใบสีเขียวอ่อนทั้ง 2 ด้าน บางครั้งมีสีเทา ใบบางและห้อยลง โดยทำมุมกับเส้นขนานใบ 40-50 องศา เปลือกใบมีลักษณะเรียบเป็นมัน สีเทาสลับขาว น้ำตาลแดงเป็นบางแห่งสลับกัน ยาวตามลำต้น เปลือกนอกจะร่อนหลุดออกจากผิวของลำต้นเมื่อถึงฤดูแต่ละปี ช่อดอกเกิดระหว่างกิ่งกับใบ มีดอกย่อย 1-3 ดอก ดอกมีสีเหลืองนวล ผลมีลักษณะครึ่งวงกลมหรือรูปถ้วย ผิวนอกแข็งเมื่อยังอ่อนอยู่จะมีสีเขียวและจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เมื่อผลแก่ผ่าจะแยกออกทำให้เมล็ดที่อยู่ภายในร่วงหล่นออกมา ลักษณะเนื้อไม้มีสีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลแดง แก่นมีสีน้ำตาล เนื้อไม้ค่อนข้างละเอียด มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.9-1.0 ในสภาพแห้ง จึงนับว่าเป็นไม้ที่มีน้ำหนักประมาณ 500-1000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เนื้อไม้แตกร้าวง่าย โดยไม้ยูคาลิปตัสมีความแข็งแรงสูงถึง 828 กิโลกรัมต่อเมตร จึงทำการแปรรูปและตกแต่งยาก มีค่าความเหนียวต่ำ โดยวัดในสภาพแห้งได้ 2.33 กิโลกรัมต่อเมตร จากค่าดังกล่าว แสดงได้ว่ายูคาลิปตัสเป็นไม้ที่มีความแกร่งสูงและแตกร้าว [23]

เส้นใยของยูคาลิปตัสมีความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 0.9-1.0 มิลลิเมตร ความกว้างเส้นใยประมาณ 14-16 ไมโครเมตร ความหนาแน่นเซลล์ 4.0-4.5 ไมโครเมตร ความหนาของเส้นใย 80-90 ไมโครกรัมต่อเมตร [24] ส่วนองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย เซลลูโลสประมาณร้อยละ 47 ลิกนินประมาณร้อยละ 20 เฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 23 สารแทรกที่ละลายในน้ำร้อน (hot water soluble) ประมาณร้อยละ 2.4 สารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์และเบนซีน (alcohol benzene soluble) ประมาณร้อยละ 1.5 และเถ้าร้อยละ 0.4 ที่เหลือเป็นสารประกอบของสารอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์อื่นๆ [17, 25]

#### 2.1.6.4 การใช้ประโยชน์จากไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัสได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น พาร์ทิเคิลบอร์ด ปาร์เก้ ถ่าน และเยื่อกระดาษ ขึ้นไม้ยูคาลิปตัสสับเมื่อนำไปทำเยื่อกระดาษจะได้เยื่อคุณภาพดี เมื่อนำไปทำเยื่อโดยกรรมวิธีทางเคมีจะได้เยื่อที่มีน้ำหนักโดยเฉลี่ย 3.75 ตันต่อไม้หนึ่งไร่ ซึ่งถือว่าให้ผลผลิตในปริมาณที่สูงเหมาะสมสำหรับผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งยูคาลิปตัสยังสามารถส่งออกในรูปแบบไม้สับไปต่างประเทศได้อีกด้วย [17]

#### 2.1.7 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ (chemical composition of wood)

องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก ดังแสดงในตารางที่ 2-1 โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของ hardwood และ softwood [2]

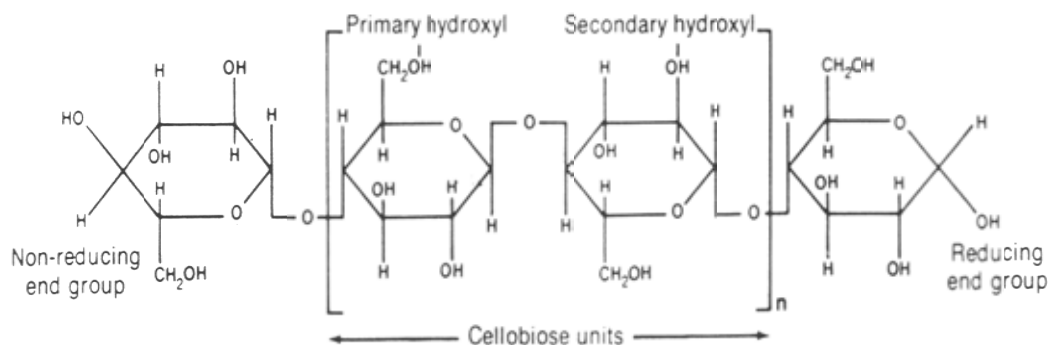
องค์ประกอบทางเคมี หน่วย: ร้อยละ	Softwood	Hardwood
เซลลูโลส (cellulose)	~ 45	~ 43
เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)	15-20	15-30
ลิกนิน (lignin)	24-32	17-25
สารแทรก (extractives)	~ 3.4	~ 2.0

##### 2.1.7.1 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลส คือ คาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน และจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ชนิดหนึ่ง หน่วยย่อยพื้นฐาน (basic subunit) ของเซลลูโลส คือ เซลโลไบโอส (cellobiose) ประกอบด้วย กลูโคส 2 โมเลกุล เชื่อมต่อกัน ความยาวของสายโซ่เซลลูโลส (degree of polymerization, DP) คือ จำนวนของหน่วยกลูโคสที่มาเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ พบว่าในเนื้อไม้ปกติมี DP ถึง 10,000 หน่วย โดยสมบัติของเซลลูโลสจะขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่เซลลูโลส ในไม้ส่วนใหญ่จะมีเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 40-45 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง [10] ภาพที่ 2-3 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส

เซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสจำนวนมากมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า (1-4) ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4 glycosidic bond) มีสายโซ่เป็นเส้นตรง (linear chain)

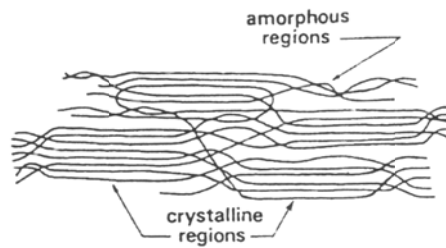
โมเลกุลของกลูโคสจะเชื่อมต่อกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสโมเลกุลหนึ่งกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสโมเลกุลถัดไป [12, 26]



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของเซลลูโลส [16]

การจัดเรียงตัวของสายโซ่แต่ละเส้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในโมเลกุล (intramolecular) และระหว่างโมเลกุล (intermolecular) ซึ่งเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, -OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวนในโมเลกุลของกลูโคสที่อยู่ถัดไป และเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่เซลลูโลสที่ขนานกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของกลูโคสในอีกสายโซ่หนึ่งของเซลลูโลส [17]

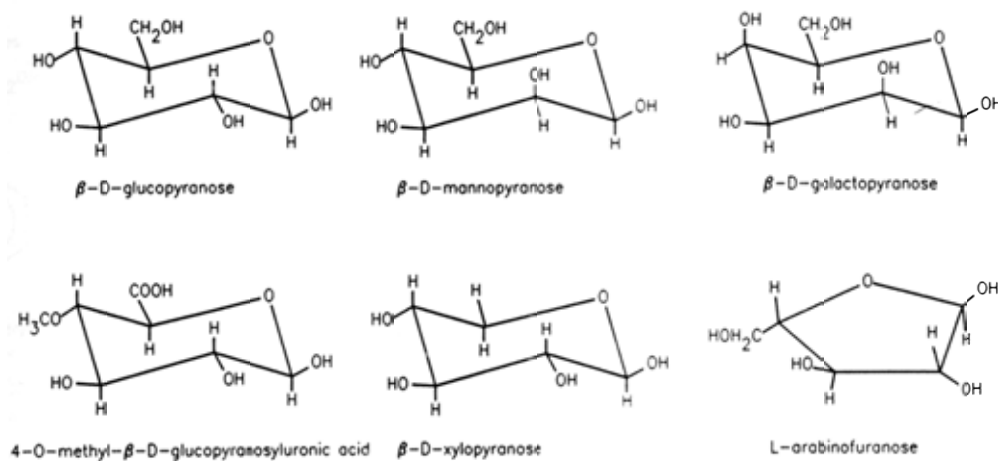
โมเลกุลของเซลลูโลสจะมีการเรียงตัวรวมกลุ่มกันเป็นเส้นใยขนาดย่อย (microfibril) โดยบางส่วนจะมีการเรียงตัวแบบเป็นผลึก (crystalline region) คือ โมเลกุลจะมีการจัดเรียงกันอย่างหนาแน่น เป็นระเบียบ เป็นส่วนที่ทำให้เซลลูโลสแข็งแรงสูง แข็ง ไม่เปราะง่าย ทำให้สารเคมีหรือตัวทำละลายเข้าทำปฏิกิริยาหรือซึมผ่านได้ยาก และบางส่วนของโมเลกุลมีการเรียงตัวแบบอสัณฐาน (amorphous region) คือ มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการรับน้ำและความชื้นได้ดี ทำให้บริเวณนี้ไม่ค่อยแข็งแรง มีความยืดหยุ่น ทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้ง่าย [16, 17] ดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 บริเวณส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานของเซลลูโลส [16]

### 2.1.7.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซ็กคาไรด์เช่นเดียวกับเซลลูโลส พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่ต่างกันว่าเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด ได้แก่ กลูโคส (glucose) กาแลกโตส (galactose) แมนโนส (mannose) ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 6 อะตอม และไซโลส (xylose) กับอะราบิโนส (arabinose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และอาจมีกรดกลูคูโรนิก (glucuronic) เป็นองค์ประกอบเช่นกัน [12, 26] ดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส [26]

เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นแบบกิ่งก้าน เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดจึงมีการเรียงตัวเป็นแบบอสัณฐานสูง เฮมิเซลลูโลสจึงถูกทำลาย (degradation) ได้ง่ายกว่าเซลลูโลส ส่วนความยาวของสายโซ่โมเลกุล (DP) ของเฮมิเซลลูโลสจะประมาณ 100-200 ต่อเฮมิเซลลูโลส 1 โมเลกุล ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส [12]

เฮมิเซลลูโลสมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเยื่อและสมบัติของเยื่อ เนื่องจากสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสมีความเป็นกิ่งก้าน (branching chain) ทำให้เกิดพันธะกับเส้นใยอื่นได้ดี ส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวของเส้นใยกันมากขึ้น เพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อ เส้นใยจะมีความยืดหยุ่นสูง เยื่อที่มีเฮมิเซลลูโลสสูงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ โดยเฉพาะความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความแข็งแรงต่อการพับของกระดาษ (folding endurance) และจะส่งผลให้ผลผลิตเยื่อนั้นสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเส้นใยไม่โดนทำลายมากในกระบวนการผลิตเยื่อแบบเคมี

ส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตของเส้นใย คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จะถูกเรียกรวมกันว่า ไฮโดรเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งไฮโดรเซลลูโลสสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ตามการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนี้

#### 2.1.7.2.1 แอลฟาเซลลูโลส ( $\alpha$ -cellulose)

เป็นส่วนที่เรียกว่า เซลลูโลสที่แท้จริง ไม่สามารถละลายในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้องได้ ในการผลิตเยื่อไม่สามารถแยกแอลฟาเซลลูโลสออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ และมักจะมีน้ำตาลแมนแนน (mannan) และกลูโคแมนแนน (glucomannan) ปนด้วยเสมอ เนื่องจากทั้งสองตัวนี้ไม่ละลายในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 เช่นกัน โดยแอลฟาเซลลูโลสจะมีโมเลกุลของกลูโคสหรือ DP ตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป แอลฟาเซลลูโลสนั้นมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ [17]

#### 2.1.7.2.2 เบต้าเซลลูโลส ( $\beta$ -cellulose)

เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และจะตกตะกอนในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด เบต้าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในต่าง ค่า DP ของเบต้าเซลลูโลสจะอยู่ระหว่าง 100-200 หน่วย [17]

### 2.1.7.2.3 แกมมาเซลลูโลส ( $\gamma$ -cellulose)

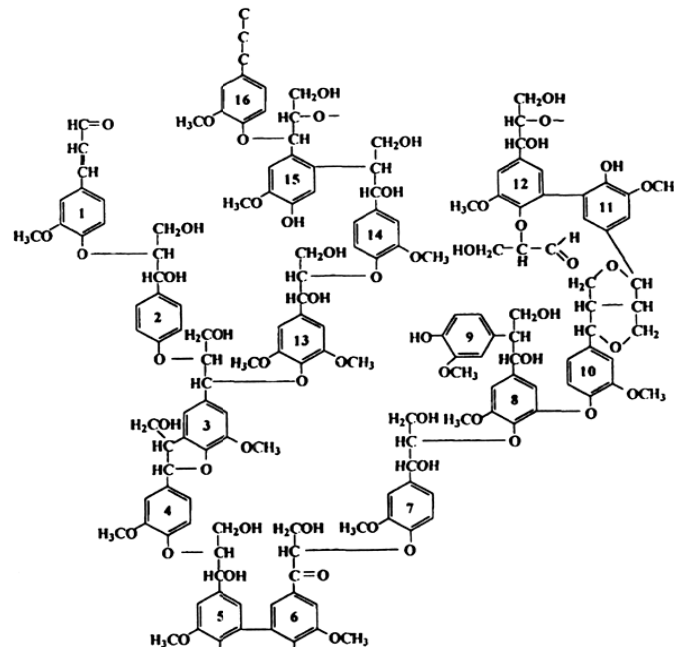
เป็นเซลลูโลสซึ่งละลายในสารละลายไซโตียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด แต่จะตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ ดังนั้นแกมมาเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่เป็นของเหลวในสารละลายต่างค่า DP ของแกมมาเซลลูโลสจะต่ำกว่า 10 หน่วย [17]

ถ้าปริมาณ  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$ -cellulose ในเนื้อไม้เปอร์เซ็นต์สูง จะทำให้ผลผลิตสูงทั้งเยื่อฟอกและเยื่อไม่ฟอก [17]

### 2.1.7.3 ลิกนิน (lignin)

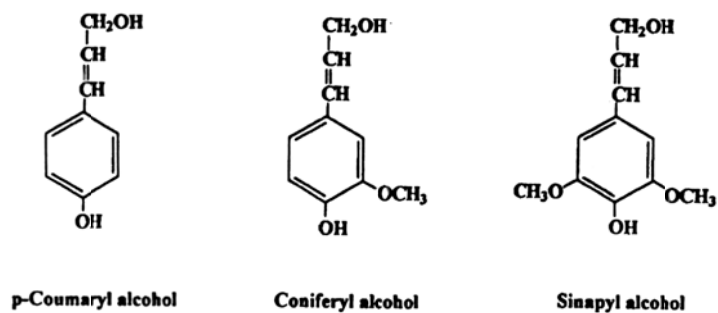
ลิกนิน เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเนื้อไม้ พบมากในผนังเซลล์พืช โดยทั่วไปเนื้อไม้จะมีลิกนินประมาณร้อยละ 18-30 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ด้วย โดยลิกนินอยู่กันอย่างหนาแน่นทั้งภายในและภายนอกของเส้นใย มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ (amorphous) มีความเข้มข้นมากบริเวณมิดเดิลลามেলা ลิกนินทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เนื้อไม้ คือ มีหน้าที่เหมือนกาวหรือตัวยึดทำให้เส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมติดกัน และช่วยต้านทานการทำลายจากพวกจุลินทรีย์ ไม่ให้เนื้อไม้เกิดการเสื่อมสลาย ส่วนใหญ่พบว่าลิกนินมีโมเลกุลเป็นวงแหวน ซึ่งประกอบด้วยหน่วยเฟนิลโพรเพน (phenylpropane unit) และมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการรวมตัวของหน่วยเฟนิลโพรเพน (ภาพที่ 2-6 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของลิกนิน) ลิกนินมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature) หรืออุณหภูมิที่เกิดการอ่อนตัว (softening temperature) ที่ประมาณ 130-150 องศาเซลเซียส [17, 27, 28]

สารประกอบลิกนินสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบคือ แบบ p-coumaryl alcohol แบบ coniferyl alcohol และแบบ sinapyl alcohol โดยพวกหญ้าหรือลำต้นของพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้จะพบโมโนเมอร์ทั้งสามแบบ ส่วนในเนื้อไม้เนื้อแข็งจะพบโมโนเมอร์แบบ coniferyl alcohol ร้อยละ 50-75 และแบบ sinapyl alcohol ร้อยละ 20-25 ส่วนเนื้อไม้เนื้ออ่อนจะพบแบบ coniferyl alcohol เพียงอย่างเดียว [12, 14] ภาพที่ 2-7 แสดงหน่วยโครงสร้างหลักของลิกนิน ส่วนองค์ประกอบธาตุของลิกนินในไม้เนื้อนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้ spruce [27]

ลิกนินที่แยกได้จากการทดลอง และลิกนินในเชิงพาณิชย์มีลักษณะเป็นของแข็งชิ้นเล็กๆ โดยปกติเป็นผงสีน้ำตาล ไม่ละลายน้ำ มีความหนาแน่น 1.3-1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดัชนีการหักเหของแสงเท่ากับ 1.6 โดยสมบัติของลิกนินที่ไม่ละลายในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 72 จะใช้เป็นตัวบอกความแตกต่างระหว่างลิกนิน เซลลูโลส และคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ ในไม้ [14]



ภาพที่ 2-7 หน่วยโครงสร้างหลักของลิกนิน [27]



## ตารางที่ 2-2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของลิกนินในไม้ [14]

ชนิด	องค์ประกอบธาตุของลิกนินในไม้ (ร้อยละ)			
	คาร์บอน (C)	ไฮโดรเจน (H)	ออกซิเจน (O)	เมทอกซี (OCH <sub>3</sub> )
Softwood	63.8	6.3	29.9	15.8
Hardwood	59.8	6.4	33.7	21.4

ลิกนินเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ไปขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใยในกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่ำ และหากมีปริมาณสูงจะส่งผลให้กระดาษมีสีเหลือง เนื่องจากมีหมู่โครโมฟอร์ ในกระบวนการผลิตกระดาษลิกนินจะถูกกำจัดออกด้วยการไฮโดรไลซิส ด้วยกรดหรือด่างในขั้นตอนการต้มเยื่อ หรือกำจัดออกในขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยสารเคมีต่างๆ [10, 17]

ในทางการค้าลิกนินจะอยู่ในรูปต่างๆ กัน แต่นำมาใช้ประโยชน์ได้คล้ายคลึงกัน เช่น ใช้ผสมกับหินเพื่อลดฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย ใช้เป็นสารช่วยในการเกาะติด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการซ่อมผิวหน้าของถนนลาดยางมะตอย ใช้ผสมกับดินทรายในอุตสาหกรรมการหล่อ เพื่อช่วยเรื่องความแข็งแรง ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผงคาร์บอน (carbon black) เครื่องเซรามิก สีย้อมต่างๆ เม็ดสี ยาฆ่าวัชพืชและยาฆ่าแมลง ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในยางที่ต้องการให้มีน้ำหนักเบา ใช้ผลิตแทนนิน (tannin) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการฟอกหนัง ใช้กำจัดไขมันที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำ ใช้ในการกำจัดเกลือในน้ำที่ทำให้เกิดน้ำกระด้าง ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดรูพรุนในแผ่นยิปซัม [29] นอกจากนี้ลิกนินยังสามารถตกตะกอนร่วมกับโปรตีน ด้วยคุณสมบัตินี้จึงถูกใช้สำหรับทำให้น้ำบริสุทธิ์ ลิกนินยังใช้ในการสังเคราะห์สารเคมีต่างๆ เช่น วานิลิน (vanillin) และสารประกอบฟีนอล [10] ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำลิกนินไปใช้ประโยชน์อีกมากมาย เช่น ได้มีการศึกษาการนำลิกนินไปใช้ในการลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Al) ที่มีมากเกินไปในดินและน้ำ

### 2.1.7.4 สารแทรก (extractives)

สารแทรก เป็นสารที่แทรกอยู่เป็นองค์ประกอบในเนื้อไม้ ซึ่งมีอยู่ในปริมาณเล็กน้อย สารแทรกไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างในเนื้อไม้ สารแทรกมีหน้าที่ตามแต่ชนิดของสารนั้นในเนื้อไม้ เช่น ทำให้ไม้ทนต่อแมลงและการผุเน่า รวมทั้งยังเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดสี กลิ่น รส ในเนื้อไม้ ความหลากหลายของสารแทรกขึ้นอยู่กับชนิดของไม้หรือพืช ส่วนใหญ่จะ

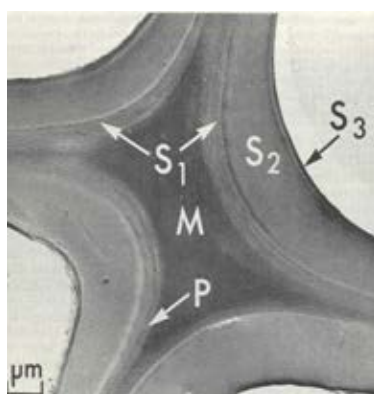
ประกอบด้วยสารมวลิโมเลกุลต่ำและอยู่ภายนอกเซลล์ สารแทรกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ สารแทรกที่ละลายน้ำได้กับสารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษนั้นสารแทรกอาจส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษได้ เช่น ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อหรือฟอกเยื่อมากขึ้น อาจทำให้เกิดตะกอนตามท่อหรืออุปกรณ์ในระบบการผลิต เกิดฟองมากขึ้นในระหว่างการล้างเยื่อ ทำให้เยื่อด่างสะอาดยากขึ้น หากมีสารแทรกตกค้างในเยื่อมากอาจทำให้เยื่อดูดซึมน้ำได้น้อยลง ส่งผลต่อการเตรียมเยื่อในการทำแผ่นกระดาษ ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดสารแทรกออกในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

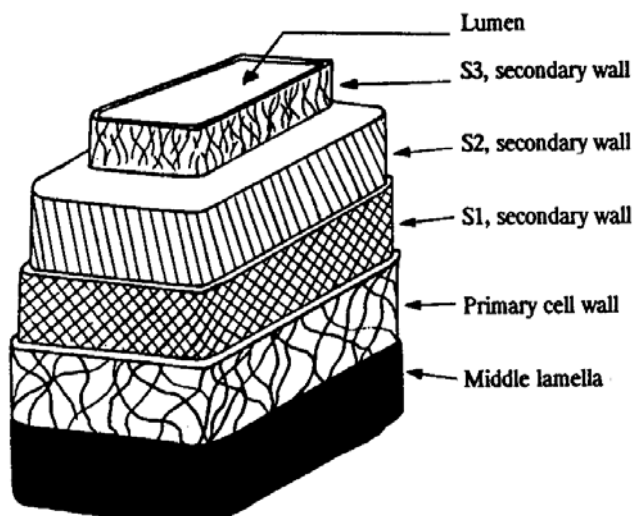
### 2.1.8 โครงสร้างของเส้นใย (fiber structure)

เส้นใยของพืชมีลักษณะเรียวยาวหัวท้ายปิด มีผนังเซลล์ ตรงกลางเป็นช่องว่าง เส้นใยของไม้แต่ละชนิดจะมีรูปร่างแตกต่างกัน และลักษณะของเส้นใยมีการแปรผันตามอัตราการเจริญเติบโตและปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเส้นใยที่มีการเจริญเติบโตในช่วงฤดูฝนนั้นเส้นใยจะมีผนังเซลล์บาง และลูเมนกว้าง ส่วนเส้นใยที่มีการเจริญเติบโตในฤดูแล้งนั้นผนังเซลล์ของเส้นใยจะหนา และลูเมนแคบ

โครงสร้างของเส้นใยมีการแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้นมิดเดิลลามেলা (middle lamella) ชั้นผนังเซลล์ (cell wall) และ ลูเมน (lumen) [12] ดังแสดงในภาพที่ 2-8 และภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-8 ชั้นมิดเดิลลามেলা (M) และโครงสร้างของเส้นใย [26]



ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของเส้นใย [12]

#### 2.1.8.1 ชั้นมิดเดิลลามেলা (middle lamella, M)

ชั้นมิดเดิลลามেলাเป็นชั้นบริเวณนอกสุดของเส้นใย โดยเป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นใย ประกอบด้วยลิกนิน (lignin) ทำหน้าที่เหมือนกาว เป็นตัวประสานให้เส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมติดกันในเนื้อไม้ ซึ่งไม่ได้เป็นส่วนของผนังเซลล์ เนื่องจากมิดเดิลลามেলাมีลิกนินอยู่มาก จึงทำให้มิดเดิลลามেলাมีความแข็งแรงและมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

#### 2.1.8.2 ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย (cell wall)

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

##### 2.1.8.2.1 ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall, P)

เป็นผนังเซลล์ชั้นแรกที่เซลล์สร้างขึ้นตั้งแต่ระยะที่กำลังเติบโตจนถึงโตเต็มที่ เป็นชั้นที่มีลักษณะบางมาก มีความหนา 0.03-0.1 ไมโครเมตร เป็นชั้นที่เกิดจากเส้นใยขนาดย่อย (microfibril) เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (amorphous)

##### 2.1.8.2.2 ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall, S)

เป็นผนังชั้นในสุด ถัดเข้าไปจากผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ เป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยเส้นใยขนาดย่อยเป็นหลัก มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยที่เป็นระเบียบ

มากกว่าผนังเซลล์ชั้นแรก ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้น  $S_1$  ชั้น  $S_2$  และ ชั้น  $S_3$  ตามการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย (microfibril) โดยชั้น  $S_1$  เป็นชั้นนอกสุดของผนังเซลล์ทุติยภูมิ มีความหนาประมาณ 0.1-0.2 ไมโครเมตร การจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยในชั้นนี้มีลักษณะคล้ายรูป S หรือ Z ชั้น  $S_2$  เป็นชั้นกลางของผนังเซลล์ทุติยภูมิ โดยเป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุด ประมาณ 0.5-8 ไมโครเมตร การจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยไปในแนวเดียวกัน ทำให้เส้นใยบริเวณนี้มีความแข็งแรงมากกว่าส่วนอื่นๆ ชั้น  $S_3$  เป็นชั้นในสุดของผนังเซลล์ทุติยภูมิ โดยเป็นชั้นที่บางที่สุด ประมาณ 0.07-0.1 ไมโครเมตร หรืออาจไม่มีเลยก็เป็นได้ การจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยคล้ายกับชั้น  $S_1$

### 2.1.8.3 ลูเมน (lumen)

เป็นท่อกลวงอยู่ใจกลางของเส้นใย อยู่ถัดจากผนังเซลล์เส้นใยชั้นที่ 2 หรือ 3 เข้าไป ลูเมนทำหน้าที่ส่งผ่านให้สารเคมี น้ำ และอาหารระหว่างเส้นใย

### 2.1.9 ไฟน์ (fines)

ไฟน์เป็นใยละเอียดหรือเป็นส่วนส่วนของเส้นใยที่สามารถลอดผ่านตะแกรงของเครื่องคัดขนาดเส้นใย (Bauer-McNett classifier) ขนาด 200 เมช ซึ่งมีขนาดรูเปิด 76 ไมโครเมตร ได้ [3, 4] ไฟน์มีพื้นฐานวิทยาศาสตร์และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างไปจากเส้นใย (fiber) โดยไฟน์มีปริมาณสารแทรก และลิกนินมากกว่าเส้นใย [5] ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้ย่อมส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษด้วย เช่น ความเรียบ ความทึบแสง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์จะส่งผลต่อความเรียบ ความทึบแสงของกระดาษ [30]

ไฟน์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามแหล่งที่มาดังนี้คือ primary fines ซึ่งได้มาจากไม้ขณะต้มเยื่อ โดยมาจากเซลล์พาเรนไคมาและเซลล์เวสเซล เป็นต้น secondary fines ซึ่งเป็นไฟน์ที่เกิดจากการบดเยื่อเป็นส่วนใหญ่ โดยจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ของผนังเส้นใย ซึ่งเมื่อพุดถึงไฟน์โดยทั่วไปแล้วจะหมายความถึง secondary fines เป็นส่วนใหญ่ และ tertiary fines ซึ่งเป็นไฟน์ที่หลุดล่อนออกมาจากเครื่องผลิตกระดาษ โดยออกมาพร้อมกับน้ำที่ลอดผ่านตะแกรงเดินแผ่น (white water)

ไฟน์ที่เกิดจากเยื่อเคมีและเยื่อเชิงกลมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาด รูปร่าง และคุณลักษณะของผิวหน้า ดังนี้คือ

### 2.1.9.1 ไฟน์ของเยื่อเคมี (chemical pulp fines)

ไฟน์ของเยื่อเคมีประกอบด้วย

#### 2.1.9.1.1 primary fines

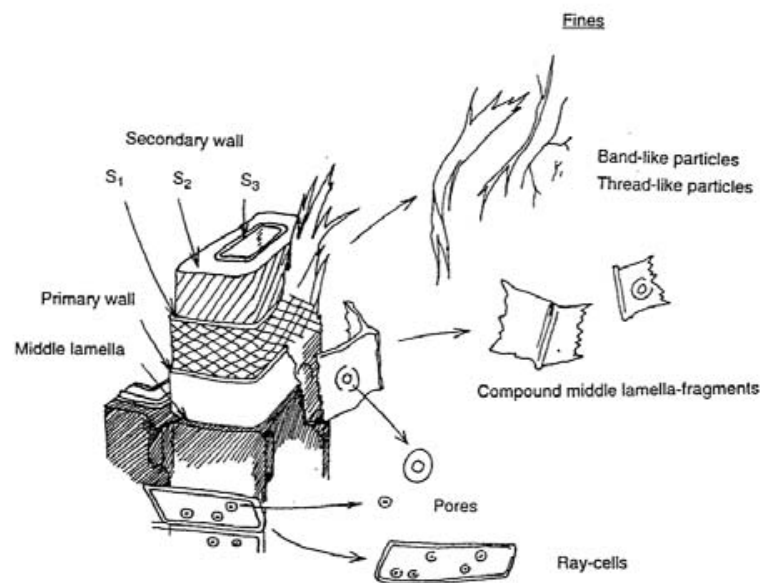
ซึ่งเป็นส่วนต่างๆ ของเซลล์ไม้ที่เกิดก่อนที่จะนำมาตีเยื่อ

#### 2.1.9.1.2 secondary fines

เกิดขณะตีเยื่อ โดยจะเป็นส่วนของเส้นใย แขนงของเส้นใย (fibrillar) และบางส่วนจากผนังเส้นใย [31, 32]

### 2.1.9.2 ไฟน์ของเยื่อเชิงกล (mechanical pulp fines)

ไฟน์ของเยื่อเชิงกลมีลักษณะการเกิดไฟน์ดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 ลักษณะของไฟน์ในเยื่อเชิงกล [4]

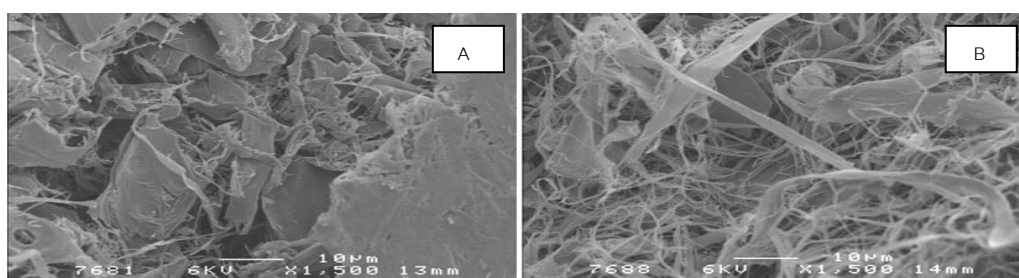
โดยไฟน์ของเยื่อเชิงกลประกอบด้วย

#### 2.1.9.2.1 flake-like fines

เป็นชิ้นส่วนที่มาจากมิดเดิลลาเมลลา ผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ และ เรย์เซลล์ เป็นต้น โดย flake-like fines เกิดมาจากส่วนนอกของผนังเซลล์ มีลิกนินใน ปริมาณที่มาก และมีเซลลูโลสปริมาณที่น้อย ดังภาพที่ 2-11 A [4, 33]

#### 2.1.9.2.2 fibrillar fines

มีลิกนินปริมาณน้อยกว่า flake-like fines แต่ fibrillar fines จะมีสารแทรกมากกว่า ซึ่งหลักๆ fibrillar fines จะเกิดมาจากชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ ดังภาพที่ 2-11B [4, 33]



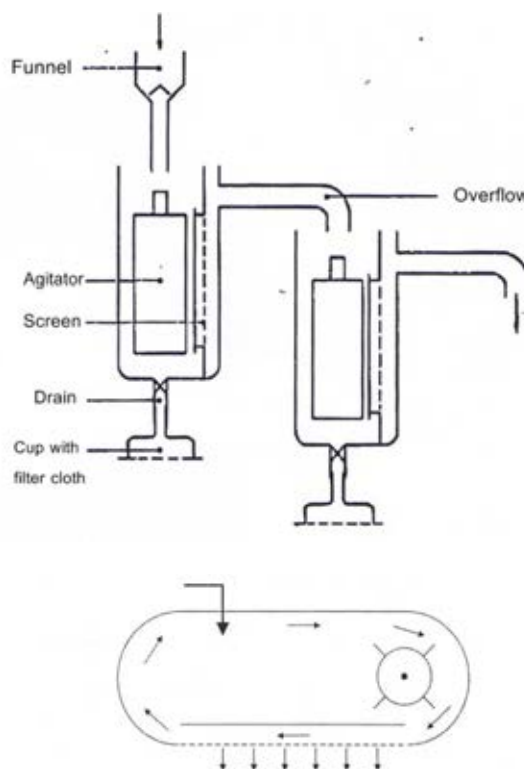
ภาพที่ 2-11 flake-like fines (A) และ fibrillar fines (B) [34]

ความแตกต่างหลักๆ ระหว่างเส้นใยกับไฟน์ คือ การที่ไฟน์มีพื้นที่ผิวมาก จึงมี บทบาทสำคัญต่อการดูดซึมสารเคมีและมีผลต่อการดูดซึมน้ำ โดยไฟน์ดูดน้ำได้ถึง 2-3 เท่าของ เส้นใย

#### 2.1.10 Bauer-McNett (Bauer-McNett classification)

การคัดขนาดเส้นใยโดยใช้เครื่องคัดขนาดเส้นใยเป็นวิธีที่ใช้กันมากในการจัดกลุ่ม เยื่อที่มีความยาวเส้นใยใกล้เคียงกันไว้ด้วยกัน ในขณะที่ปัจจัยอื่นๆ เช่น ความกว้างและความ ยืดหยุ่นของเส้นใยมีผลเพียงเล็กน้อย [35] เครื่องคัดขนาดเส้นใยมีลักษณะเป็นถังแคบ 2 ถึง หรือ มากกว่านั้น โดยลดหลั่นกันคล้ายน้ำตก แต่ละถังมีความลึก 355 มิลลิเมตร ความกว้าง 127 มิลลิเมตร ความยาว 320 มิลลิเมตร และมีตะแกรงขนาด 335 ตารางเซนติเมตร ภายในถังมีตัวปั่น กวน (agitator) หมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็ว  $580 \pm 25$  รอบต่อนาที โดยในแต่ละรอบการใช้

งาน จะใช้เยื่อแห้งประมาณ 10 กรัม และใช้อัตราการไหลของน้ำสม่ำเสมอที่ 11.35 ลิตร/นาที [36] ภาพที่ 2-12 แสดงลักษณะและส่วนประกอบของเครื่อง ส่วนตารางที่ 2-3 แสดงขนาดของช่องเปิดของตะแกรงขนาดต่างๆ



ภาพที่ 2-12 ส่วนประกอบของ เครื่องคัดขนาดเส้นใย (Bauer McNett classifier) [37, 38]

ตารางที่ 2-3 เบอร์ตะแกรง เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตะแกรง และขนาดช่องเปิดของตะแกรง [36]

เบอร์ตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตะแกรง (mm)	ขนาดช่องเปิดของตะแกรง (mm)
30	$0.390 \pm 0.039$	$0.595 \pm 0.030$
50	$0.215 \pm 0.022$	$0.297 \pm 0.015$
100	$0.110 \pm 0.011$	$0.149 \pm 0.009$
200	$0.053 \pm 0.008$	$0.074 \pm 0.005$

### 2.1.11 การบดเยื่อ

การบดเยื่อ (beating) เป็นการใช้แรงกลในการปรับสภาพผนังของเส้นใย ให้เหมาะสมกับการผลิตกระดาษ โดยไปเพิ่มการบวมตัวของเส้นใย เพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใย ทำให้เส้นใยอ่อนตัวลง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใย ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงขึ้น

การบดเยื่อทำโดยให้น้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นสูงไหลผ่านช่องแคบระหว่างตัวหมุน (rotor) กับตัวหยุดอยู่กับที่ (stator) ของเครื่องบดเยื่อ ทำให้เกิดแรงเชิงกลและแรงอัด ส่งผลให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างเส้นใยและตัวเครื่องบดเยื่อ ชั้นของผนังเซลล์เส้นใยจึงเกิดการฉีกขาด ส่งผลให้เส้นใยดูดซึมน้ำมากขึ้น เส้นใยมีการพองตัวมากขึ้น เส้นใยจึงมีความยืดหยุ่นและนุ่มขึ้น เมื่อนำเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อไปผลิตกระดาษ กระดาษจึงมีความหนาแน่นสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีการยุบตัวแนบชิดกันได้ดีขึ้น และเนื่องจากพื้นที่ผิวของเส้นใยมีการฉีกขาด ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้น ทำให้การสานตัวในการขึ้นแผ่นกระดาษดีขึ้น

ลักษณะของเส้นใยในระหว่างการบดเยื่อสามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มจากเส้นใยจะเปียกน้ำและดูดซับน้ำเอาไว้ ทำให้เกิดการบวมตัวของเส้นใย ส่วนที่เป็นผลึกของเส้นใยโดนทำลาย ส่งผลให้น้ำสามารถเข้าไปด้านในและบวมตัวได้ดี เกิดการแตกหรือฉีกขาดของเส้นใย เส้นใยมีการแตกแขนง (fibrillation) ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใย ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงความแข็งแรงพื้นที่ผิวของเส้นใยในกระดาษ สุดท้ายเกิดการแยกของชั้นผนังเซลล์ เกิดการแยกระหว่างชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิและชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ ทำให้เส้นใยมีความยืดหยุ่น (flexible) ได้ดี

โดยทั่วไปแล้วการบดเยื่อส่งผลให้ค่าความสามารถในการระบายน้ำ (freeness) ของเยื่อลดลง ช่วยปรับปรุงพื้นที่ผิวของเส้นใยให้ดีขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของกระดาษที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของเส้นใยมีค่าสูงขึ้น เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความแข็งแรงต่อการหักพับ (folding endurance) แต่ทำให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear strength) ลดลง เนื่องจากความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความยาวของเส้นใยเป็นส่วนใหญ่ การบดเยื่อส่งผลให้เส้นใยมีขนาดสั้นลง จึงส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าลดลง [11, 12, 39,40]



## 2.1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเส้นใยกับสมบัติของกระดาษ

### 2.1.12.1 ความโค้งงอและการหักงอของเส้นใย

ความโค้งงอและการหักงอของเส้นใย ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษได้ โดยเส้นใยที่มีการโค้งงอและหักงอเพิ่มมากขึ้น ทำให้ส่งผลทางด้านบวกและด้านลบต่อสมบัติกระดาษดังต่อไปนี้ ผลทางด้านบวก คือ ทำให้กระดาษมีความฟู ความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น มีความยืดหยุ่นเปื่อย มีความพรุนและการดูดซับดีขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของพวกกระดาษชำระ ส่วนผลทางด้านลบ คือ ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งดิ่งลดลง [27, 41-43] ซึ่งเป็นสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ในการผลิตกระดาษที่ใช้ความเร็วในการเดินกระดาษสูง

### 2.1.12.2 ความยาวของเส้นใย

ความยาวของเส้นใยส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ โดยหากมีเส้นใยยาวปริมาณมาก จะส่งผลทางด้านบวก คือ ให้ความต้านทานแรงฉีก ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการพับเพิ่มขึ้น ส่วนผลทางด้านลบ จะส่งผลให้ความหนาแน่น และความสม่ำเสมอของแผ่นกระดาษลดลง [40]

### 2.1.12.3 ปริมาณไฟน์ (secondary fines)

ปริมาณไฟน์ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษดังนี้ หากเพิ่มปริมาณไฟน์ให้สูงขึ้น ผลทางด้านบวกจะทำให้ค่าการกักเก็บน้ำ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งดิ่ง การทนต่อการพับ ความเรียบ ความยืดหยุ่นเปื่อย ความหนาแน่น เพิ่มขึ้น ผลทางด้านลบจะทำให้อัตราการระบายน้ำ ความต้านทานแรงฉีก การไหลผ่านของอากาศ การกระเจิงแสงลดลง [44]

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sirvio และ Nurminen [44] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติกระดาษอันเนื่องมาจากไฟน์โดยใช้เยื่อเชิงกล TMP (thermo mechanical pulp) และเยื่อคราฟต์ (kraft) พบว่าคุณลักษณะของไฟน์ที่เป็น fibrillar particle จะช่วยเพิ่มการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย ทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ flake-like particle จะส่งเสริมในเรื่องค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (light scattering coefficient) และพบว่าไฟน์ของเยื่อเชิงกลมี fibrillar content ต่ำกว่าเยื่อคราฟต์ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงเพิ่มน้อยกว่า การเพิ่ม

ปริมาณไฟน์ของเยื่อคราฟต์ทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงไม่เปลี่ยนแปลง

Patel และ Trivedi [45] ได้ศึกษาสมบัติทางด้านความแข็งแรงและการสร้างพันธะของอนุภาคขนาดเล็กจากสารเติมแต่ง (filler) จากเส้นใย และจากกลุ่มอนุภาค (aggregate) ของสารเติมแต่งและเส้นใย ในเยื่อผสมระหว่าง bamboo-hardwood (80:20) กับเยื่อคราฟต์ (kraft) และจากน้ำที่ลอดผ่านตะแกรงเดินแผ่น (white water) จากโรงงาน พบว่า fiber fines มีความยืดหยุ่นมากกว่า filler fines ทำให้การแพ็คตัวในช่องว่างง่ายกว่า การผสมของ fiber fines ในสัดส่วนที่แตกต่างกันจะช่วยในเรื่องการแพ็คตัวในช่องว่างระหว่างเส้นใย นอกจากนี้ยังพบว่า filler และ white water fines ลดสมบัติด้านความแข็งแรง ในขณะที่ fiber fines ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 20-30 โดยไปเติมเต็มในช่องว่างและสร้างพันธะระหว่างเส้นใย

Kangas และ Kleen [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเคมีของผิวหน้าและสมบัติทางโครงสร้างของไฟน์จากเยื่อเชิงกล (mechanical pulp fines) พบว่า ไฟน์ประกอบด้วยลิกนินปริมาณมาก อีกทั้งมีสารแทรก (extractives) เพคติน (pectin) และไซแลน (xylan) มากกว่าเส้นใย โดย fibrillar fines มีสารแทรกมากกว่า flake-like fines ส่วน flake-like fines นั้นโดยส่วนใหญ่จะเป็นลิกนิน ที่บริเวณผิวหน้าของ fibrillar fines จะมีสารแทรกสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีการดูดซับอนุภาคของเรซิน ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการที่ fibrils มีผิวหน้าจำเพาะที่กว้าง และ/หรือ มาจากส่วนประกอบทางเคมีที่ผิวหน้า

Lee และคณะ [46] ศึกษาผลของชนิดไฟน์ต่อสมบัติของเยื่อเคมีรีไซเคิล พบว่า ปริมาณไฟน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของกระดาษเพิ่มขึ้น โดย secondary fines มีผลต่อความหนาแน่นมากกว่า primary fines ไฟน์ประเภท secondary fines จากเยื่อ DIP (deinking pulp) ส่งผลต่อความหนาแน่นกระดาษอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่ม secondary fines ความแข็งแรงต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้น โดย secondary fines จาก DIP ให้ค่าความแข็งแรงมากกว่า secondary fines จาก HW-BKP (hardwood-bleached kraft pulp) ส่วน primary fines จาก HW-BKP ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงเพียงเล็กน้อย โดยดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลง เมื่อเพิ่ม primary fines จาก HW-BKP มากกว่าร้อยละ 30 ความพรุนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่ม secondary fines มากกว่าร้อยละ 30 และเพิ่ม primary fines มากกว่าร้อยละ 50 โดยไม่คำนึงถึงชนิดของเยื่อ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1.1 เยื่อคุณภาพดีตัดจากกระบวนการผลิตแบบโซดาทั้งแบบผ่านการฟอกเยื่อและไม่ผ่านการฟอกเยื่อ เกรดทางการค้า จาก SCG PAPER โรงงานวังศาลา

3.1.1.2 กระดาษกรองเบอร์ 4; ยี่ห้อ Whatman บริษัท Whatman International จำกัด ประเทศอังกฤษ

##### 3.1.2 เครื่องมือ

3.1.2.1 เครื่องคัดแยกขนาดเส้นใย (Fiber Classifier); รุ่น Bauer McNett บริษัท Universal Engineering Corporation ประเทศอินเดีย

3.1.2.1 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (0.1-21 kg); ยี่ห้อ AND รุ่น GX-20K ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2.2 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (0.005-4,000 g); รุ่น TB-4002 บริษัท Denver Instrument ประเทศเยอรมนี

3.1.2.3 ตู้อบ(hot air oven); ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH ประเทศเยอรมนี

3.1.2.4 เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator); ยี่ห้อ Formax บริษัท Adirondack Machine Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.5 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer, FQA); ยี่ห้อ Optest บริษัท Optest Equipment ประเทศแคนาดา

3.1.2.6 เครื่องบดเยื่อ (valley beater); รุ่น UEC-2018A บริษัท Universal Engineering Corporation ประเทศอินเดีย

3.1.2.7 เครื่องวัดค่าสภาพกระดาษได้ (freeness tester); รุ่น LTDA บริษัท Regmed Industria Technica de Frecisao ประเทศบราซิล

3.1.2.8 เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (sheet former); รุ่น Rapid-Köthen Blattbildner บริษัท PTI Laboratory Equipment ประเทศออสเตรเลีย

3.1.2.9 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); ยี่ห้อ Frank ประเทศเยอรมนี

3.1.2.10 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength tester); รุ่น Strograph E-S บริษัท Toyoseiki Seisaku-SHO ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2.11 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (elmdolf tearing resistance tester); รุ่น Protear ยี่ห้อ Thwing-Albert บริษัท Thwing-Albert Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.12 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง; ยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color Touch PC บริษัท Technidyne Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2.13 เครื่องวัดความเรียบของกระดาษ (smoothness tester); ยี่ห้อ Toyo Seiki Seisaku-Sho ประเทศญี่ปุ่น

3.1.2.14 กระจกบอทดวง (cylinder) ขนาด 25, 100 และ 1000 มิลลิลิตร

3.1.2.15 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 25, 50, 250 และ 500 มิลลิลิตร

3.1.2.16 แท่งแก้วคนสาร (stirring rod)

3.1.2.17 เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

3.1.2.18 กรวยบุคเนออร์ (buchner funnel)

3.1.2.19 ปั๊ม (pump)

3.1.2.20 สายยาง (rubber tubing)

### 3.1.2.21 ขวดสุญญากาศ (filter flask)

### 3.1.2.22 ตะแกรงลวด (wire screen) ขนาด 250 และ 400 เมช

## 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของไฟน์ที่มีผลต่อสมบัติทางด้านกายภาพของกระดาษ โดยศึกษาถึงผลของปริมาณและชนิดของไฟน์ ได้แก่ ไฟน์ที่เตรียมจากเยื่อฟอกและไฟน์ที่เตรียมจากเยื่อไม่ฟอก ที่มีต่อสมบัติของกระดาษที่เตรียมจากเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอก รวมถึงเปรียบเทียบอิทธิพลของไฟน์ที่ได้จากเยื่อฟอกและไฟน์ที่ได้จากเยื่อไม่ฟอก ที่มีต่อสมบัติของกระดาษที่เตรียมจากเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอกและเยื่อที่ผ่านการฟอก โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดมีดังนี้

### 3.2.1 การบดเยื่อ

บดเยื่อโดยใช้เครื่องบดเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [47] เครื่องบดเยื่อ (ภาพที่ 3-1 และ 3-2) จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ bed plate และ beater roll โดยเยื่อจะถูกบดระหว่าง bed plate และ roll bars การบดเยื่อมีขั้นตอนดังนี้คือ

3.2.1.1 นำเยื่อยุคาลิปตัสที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา เกรดทางการค้า ทั้งแบบผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอกเยื่อ มาทำการบดโดยแยกบด

3.2.1.2 คำนวณเยื่อที่จะใช้บด โดยในการทดลองต้องใช้เยื่อ 360 กรัมของน้ำหนักแห้ง นำเยื่อที่ซั่งแล้วใส่ลงในเครื่องบดเยื่อ คำนวณน้ำที่เติมเพื่อให้มีปริมาตรรวม 23 ลิตร ซึ่งจะมีความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) เท่ากับร้อยละ 1.56 ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก

3.2.1.3 เปิดเครื่องบดเยื่อโดยไม่ต้องแขวนตุ้มน้ำหนัก ซึ่งยังไม่ใช้การบดเยื่อ แต่เป็นเพียงการตีกระจายเยื่อ ให้เยื่อกระจายเป็นระยะเวลา 5 นาที ก่อน พอคอบ 5 นาทีแล้วจึงแขวนตุ้มน้ำหนักของเครื่องบดเยื่อและเริ่มจับเวลาในการบดเยื่อ

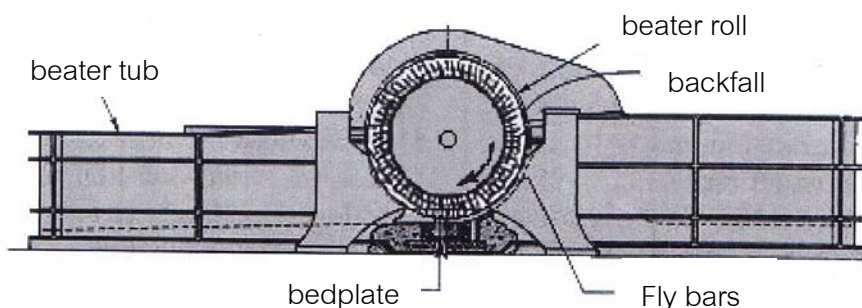
3.2.1.3 ขณะบดเยื่อทำการสูบน้ำเยื่อขึ้นมา เพื่อหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 [48] บดเยื่อจนกระทั่งได้ค่าสภาพระบายได้อยู่ในช่วง  $350 \pm 30$  มิลลิลิตร เนื่องจากค่าสภาพระบายได้ช่วงนี้เป็นช่วงที่นิยมใช้ทั่วไปสำหรับเยื่อใย

สิ้นในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการบดเยื่อที่ผ่านการฟอกอยู่ที่ 40 นาที และบดเยื่อที่ไม่ผ่านการฟอก 43 นาที

3.2.1.4 เมื่อบดเยื่อเสร็จ เอน้ำออกจากเยื่อให้เยื่อมีลักษณะเหมาะสม และหาปริมาณความชื้นของเยื่อนั้น



ภาพที่ 3-1 เครื่องบดเยื่อ (valley beater)

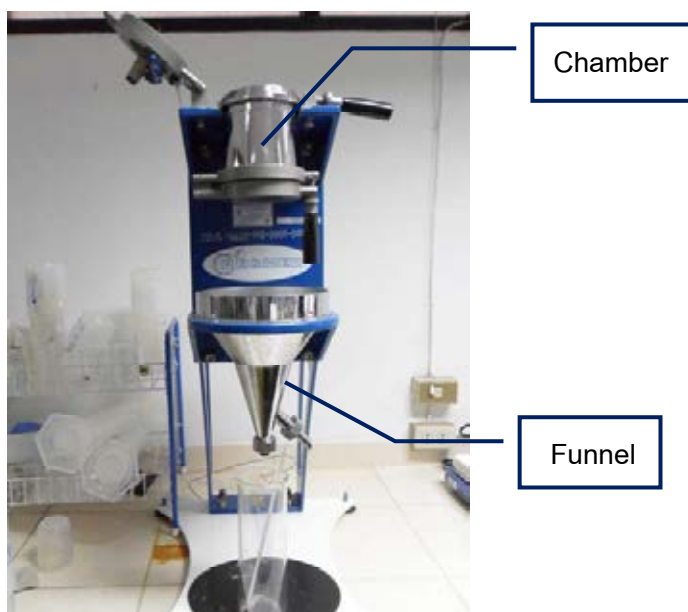


ภาพที่ 3-2 ส่วนประกอบภายในเครื่องบดเยื่อ (valley beater) [49]

### 3.2.2 การวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อสามารถวัดได้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ คือ

3.2.2.1 ขณะบดเยื่อ สุ่มน้ำเยื่อมาวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ ซึ่งค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ เป็นความสามารถในการระบายน้ำ (drainage) ของเส้นใย หรือการอุ้มน้ำของเส้นใย โดยการทดสอบจะทำตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 [48] ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 เครื่องวัดสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness tester)

หากค่าสภาพระบายได้มีค่าสูง แสดงว่าเยื่อนั้นอุ้มน้ำได้น้อย จึงระบายน้ำออกมาได้มาก แต่ถ้าค่าสภาพระบายได้มีค่าต่ำ แสดงว่าเยื่อนั้นอุ้มน้ำได้มาก จึงระบายน้ำออกมาได้น้อย

3.2.2.2 การคำนวณน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าสภาพระบายได้ ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 [48] กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร ซึ่งความเข้มข้นของเยื่อในเครื่องบดเยื่อ กับความเข้มข้นของเยื่อในการวัดค่าสภาพระบายได้ไม่เท่ากัน จึงต้องมีการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อ โดยดูตัวอย่างสูตรการคำนวณการปรับความเข้มข้นในภาคผนวก ก

3.2.2.3 เมื่อปรับความเข้มข้นของเยื่อที่จะใช้วัดค่าสภาพระบายได้แล้ว ทำการวัดค่าสภาพระบายได้ โดยอ่านค่าปริมาตรน้ำจากท่อระบายด้านข้าง และจดค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ นำเยื่อส่วนที่เหลือในเครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ไปหาความเข้มข้นของเยื่อ เพื่อปรับแก้ค่าสภาพระบายได้ หากค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของเยื่อที่หาได้เท่ากับร้อยละ 0.3 จะไม่มีการปรับแก้ค่าสภาพระบายได้

### 3.2.3 การแยกไฟน์ออกจากเยื่อ

3.2.3.1 นำเยื่อคุณภาพดีที่ผ่านการบดแล้วทั้ง 2 ชนิด คือ ที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอก มาทำการแยกไฟน์ออกจากเส้นใยขนาดอื่นๆ โดยใช้เครื่อง Bauer-McNett classifier ดังภาพที่ 3-4 ตามมาตรฐาน T 233 cm-95 [36] โดยตะแกรงที่ใช้จะมีขนาด 30, 50, 100 และ 200 เมช โดยแยกส่วนที่เป็นไฟน์ (ผ่านตะแกรง 200 เมช) ออกจากส่วนอื่นๆ ที่เหลือ (ค้ำบนตะแกรง 30, 50, 100 และ 200 เมช)



ภาพที่ 3-4 เครื่องคัดขนาดเส้นใย (Bauer-McNett classifier)

เมื่อแยกไฟน์ทั้งในเยื่อฟอกและเยื่อไม่ฟอกแล้ว จะได้ไฟน์ 2 ชนิด คือ ไฟน์จากเยื่อฟอก (bleached fines, BF) และไฟน์จากเยื่อไม่ฟอก (unbleached fines, UBF) และได้เยื่อ 2 ชนิดที่คัดแยกเอาไฟน์ออกแล้ว คือ เยื่อฟอก (bleached pulp, BP) และเยื่อไม่ฟอก (unbleached pulp, UBP)

3.2.3.2 เอน้ำจากไฟน์ทั้ง 2 ชนิด และเยื่อทั้ง 2 ชนิดออก ให้เยื่อและไฟน์มีลักษณะเหมาะสม และหาปริมาณความชื้น



### 3.2.4 การผสมเส้นใยกับไฟน์ที่อัตราส่วนต่างๆ

นำไฟน์ที่แยกออกมาจากเยื่อฟอกมาผสมกับเส้นใยของเยื่อฟอก และผสมกับเส้นใยของเยื่อไม่ฟอก และนำไฟน์ที่แยกออกมาจากเยื่อไม่ฟอกมาผสมกับเส้นใยของเยื่อไม่ฟอก และผสมกับเส้นใยของเยื่อฟอกในปริมาณต่าง ๆ แสดงดังตาราง 3-1

ตารางที่ 3-1 อัตราส่วนการผสมไฟน์กับเยื่อ

รูปแบบการผสมเยื่อกับไฟน์	ปริมาณไฟน์ (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)					
เยื่อฟอก + ไฟน์ฟอก (BP + BF)	0	5	8.78	10	20	30
เยื่อฟอก + ไฟน์ไม่ฟอก (BP + UBF)	0	5	8.78	10	20	30
เยื่อไม่ฟอก + ไฟน์ฟอก (UBP + BF)	0	5	7.79	10	20	30
เยื่อไม่ฟอก + ไฟน์ไม่ฟอก (UBP + UBF)	0	5	7.79	10	20	30

โดยมีการใส่ปริมาณไฟน์ (ทั้งไฟน์ฟอกและไฟน์ไม่ฟอก) ร้อยละ 8.78 ในเยื่อฟอกด้วย เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่หาได้จากการนำเยื่อฟอกทางการค้ามาทำการวิเคราะห์หาปริมาณไฟน์ รวมถึงใส่ปริมาณไฟน์ (ทั้งไฟน์ฟอกและไฟน์ไม่ฟอก) ร้อยละ 7.79 ในเยื่อไม่ฟอกด้วย ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่หาได้จากการนำเยื่อไม่ฟอกทางการค้ามาทำการวิเคราะห์หาปริมาณไฟน์

ปริมาณการใส่ไฟน์ที่ระดับต่าง ๆ นั้น ผู้วิจัยได้พิจารณาจากปริมาณไฟน์ที่ตรวจพบจากการนำกระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษพิมพ์เขียนขนาด A4 (กระดาษถ่ายเอกสาร) และกระดาษของจดหมายสีน้ำตาล มาทำการตรวจวัดลักษณะพื้นฐานวิทยาของเยื่อ เพื่อดูความยาวของเส้นใย ปริมาณไฟน์ ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย ดัชนีความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย ด้วยเครื่องวัดพื้นฐานวิทยาของเส้นใย พบว่ากระดาษพิมพ์เขียน A4 มีลักษณะพื้นฐานวิทยาที่ใกล้เคียงกับเยื่อคุณภาพดีทั้งชนิดฟอกและไม่ฟอกเยื่อมากที่สุด กระดาษพิมพ์เขียน A4 เป็นกระดาษที่ใช้งานจริง สามารถตรวจวัดปริมาณไฟน์ได้ร้อยละ 21.639 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปริมาณไฟน์ที่ใช้ทดลองสูงสุดที่ระดับร้อยละ 30 และที่ระดับรองลงมาคือร้อยละ 20, 10 และ 5 ส่วนปริมาณร้อยละ 8.78 และ 7.79 เป็นปริมาณไฟน์ที่เป็นปริมาณสัดส่วนจริงที่พบในเยื่อฟอกและเยื่อไม่ฟอกตามลำดับ โดยการแยกเส้นใยด้วยเครื่องคัดขนาดเส้นใย

### ตารางที่ 3-2 สัณฐานวิทยาของเยื่อแต่ละชนิด

เยื่อ	ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย				
	ความยาวเส้นใยแบบ	ปริมาณไฟน์ (%)±SD	ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย±SD	ดัชนีความหักงอของเส้นใย±SD	ความกว้างของเส้นใย±SD
	LWW±SD				
กระดาษหนังสือพิมพ์	1.572 ±0.094	41.776±1.636	0.103±0.010	1.719±0.079	19.892±0.317
กระดาษพิมพ์เขียน A4	0.956±0.046	21.639±1.487	0.073±0.001	1.501±0.030	16.603±0.156
ซองจดหมายสีน้ำตาล	2.247 ±0.089	40.408±1.535	0.087 ±0.004	1.378 ±0.039	21.665±0.151
ยูคาลิปตัสฟอกหลังบดเยื่อ	0.677±0.013	30.490±1.161	0.082±0.002	1.701±0.019	16.972 ±0.139
ยูคาลิปตัสไม่ฟอกหลังบดเยื่อ	0.722 ±0.014	24.710±0.514	0.077±0.005	1.482±0.042	17.075±0.066

### 3.2.5 การตีกระจายเยื่อ



ภาพที่ 3-5 เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator)

นำเยื่อผสมทั้ง 4 กลุ่มที่เตรียมตามอัตราส่วนดังตาราง 3-2 ไปตีกระจายด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อดังภาพที่ 3-5 จากนั้นวัดค่าสภาพระบายนํ้าของเยื่อที่ผสมตามอัตราส่วนดังกล่าวทั้ง 4 กลุ่ม

### 3.2.6 การวัดลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (fiber morphology)

นำเยื่อผสมตามอัตราส่วนทั้ง 4 กลุ่ม มาวัดค่าความยาวของเส้นใย (fiber length) ปริมาณไฟน์ (fines content) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (kink index) ความกว้างของเส้นใย (fiber width) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย FQA ดังแสดงในภาพ 3-6 ตามมาตรฐาน ISO 16065 [50] โดยแต่ละครั้งทำการวัดเส้นใยเป็นจำนวน 5,000 เส้น และทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละสภาวะ

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์เส้นใยสามารถวัดเส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 0.07 มิลลิเมตรขึ้นไป ดังนั้นการรายงานผลความยาวของเส้นใยในการทดลองนี้จะรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยแบบ LWW (mean length-weight weighted, LWW) เป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยของความยาวเส้นใยแบบถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากเส้นใยที่ยาวกว่าจะส่งผลต่อกระดาษมากกว่าเส้นใยที่สั้น โดยค่าเฉลี่ยของความยาวแบบถ่วงน้ำหนักหาได้จากสูตร [43]

$$LWW = \frac{\sum n_i L_i^3}{\sum n_i L_i^2}$$

ส่วนปริมาณไฟน์ที่วัดจากเครื่องนี้เป็นไฟน์ในส่วนที่มีขนาด 0.07-0.20 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยเป็นลักษณะที่สำคัญของเส้นใย โดยค่าดัชนีความโค้งงอสามารถหาได้จาก [43]

$$CI = L / l - 1$$

โดย CI = ค่าดัชนีความโค้งงอ (curl index)

L = ความยาวจริงของเส้นใย

l = ความยาวขจัดของเส้นใย

ส่วนค่าดัชนีการหักงอสามารถหาได้จากสมการของ Kibblewhite ดังนี้

$$\text{Kink index} = \frac{[2N_{(21-45)} + 3N_{(46-90)} + 4N_{(91-180)}]}{L_{\text{total}}}$$

โดย  $N$  = จำนวนครั้งของการหักงอของเส้นใยในช่วงมุมที่กำหนด (21-45, 46-90 และ 91-180 องศา)

$L_{total}$  = ความยาวรวมของเส้นใย



ภาพที่ 3-6 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer : FQA)

### 3.2.7 การขึ้นแผ่นทดสอบ

นำเยื่อผสมตามอัตราส่วนทั้ง 4 กลุ่ม มาขึ้นแผ่นทดสอบที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัม/ตารางเมตร เพื่อนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบแบบ Rapid-Kothen (Rapid-Kothen sheet former) แสดงดังในภาพที่ 3-7 ตามมาตรฐานการขึ้นแผ่น ISO 5269-2 [51] โดยเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบจะมี 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนขึ้นแผ่นทดสอบ (sheet forming) และส่วนอบแห้ง (dryer) แสดงดังในภาพที่ 3-8 และภาพที่ 3-9 ตามลำดับ โดยขั้นตอนการขึ้นแผ่นทดสอบมีดังนี้

3.2.7.1 นำเยื่อผสมตามอัตราส่วนทั้ง 4 กลุ่ม มาขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัม/ตารางเมตร การคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ก

3.2.7.2 เทน้ำเยื่อลงในส่วนขึ้นแผ่นทดสอบ แล้วทำการระบายน้ำออก ซึ่งขณะระบายน้ำออกเส้นใยจะเกิดการสานตัวกันเป็นแผ่นทดสอบ โดยจะได้แผ่นทดสอบที่เป็นวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร

3.2.7.3 นำแผ่นทดสอบที่ขึ้นแผ่นแล้วมาปิดประกบด้วยกระดาษซับ (blotting paper) แล้วนำมาอบแห้งในส่วนอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 นาที



ภาพที่ 3-7 เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (Rapid-Kothen sheet former)



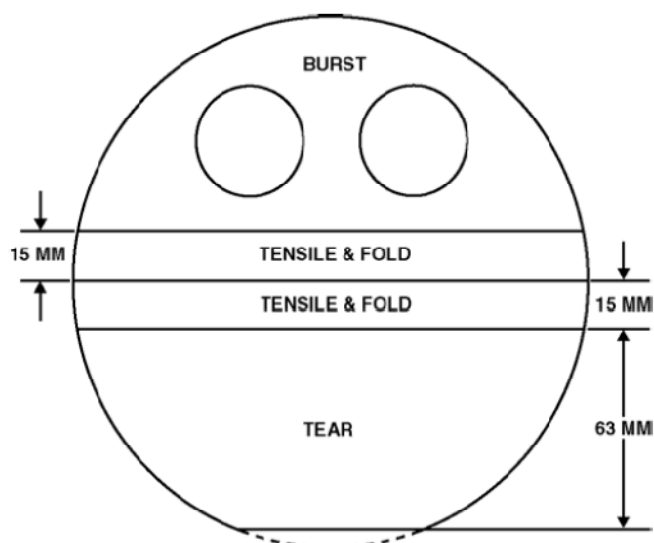
ภาพที่ 3-8 ส่วนขึ้นแผ่นทดสอบ (sheet forming) ของเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ



ภาพที่ 3-9 ส่วนอบแห้ง (dryer) ของเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ

### 3.2.8 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

ก่อนนำแผ่นทดสอบมาทดสอบสมบัติต่างๆ ควรนำแผ่นทดสอบมาทำการปรับสภาพในห้องควบคุมภาวะ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติ โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ISO (International Standard Organization) และ TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) เริ่มทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ โดยเริ่มจากการทดสอบที่ไม่ทำให้แผ่นทดสอบเสียหาย (non-destructive test) ก่อน คือ สมบัติทั่วไปของกระดาษ (basic properties) เช่น น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ความหนา (thickness) ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ความเรียบ (smoothness) รวมถึงสมบัติด้านทัศนศาสตร์ (optical properties) คือ ความขาวสว่าง (brightness) และความทึบแสง (opacity) หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นทดสอบ (destructive test) คือ สมบัติในด้านความแข็งแรง (strength properties) ต่างๆ ดังนี้ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความต้านทานต่อแรงฉีก (tear resistance) โดยทำการตัดแผ่นทดสอบเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-10 หลังจากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่างๆ ไปคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรง โดยนำความแข็งแรงนั้นหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน



ภาพที่ 3-10 ลักษณะการตัดแผ่นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบสมบัติความแข็งแรงต่างๆ [52]

### 3.2.8.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight)

น้ำหนักมาตรฐาน คือ น้ำหนักกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ที่เก็บในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ได้มีการควบคุมตามมาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นจะมีผลทำให้น้ำหนักของกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลจากการดูดหรือคายความชื้นของกระดาษตามสภาวะโดยรอบ ส่วนมากน้ำหนักมาตรฐานมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรืออาจเรียกว่าแกรม ทำการวัดโดยนำแผ่นทดสอบมาชั่งน้ำหนักแล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารพื้นที่ของแผ่นทดสอบ

### 3.2.8.2 ความหนา (thickness)

คือ ระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าด้านบนและด้านล่างของแผ่นทดสอบภายใต้ภาวะที่กำหนด โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนาดังแสดงภาพที่ 3-11 หน่วยที่วัดได้เป็นมิลลิเมตร



ภาพที่ 3-11 เครื่องวัดความหนา (thickness tester)

### 3.2.8.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)

เป็นค่าที่คำนวณได้จากการนำน้ำหนักมาตรฐานหารด้วยความหนาของแผ่นทดสอบ

### 3.2.8.4 ความเรียบ (smoothness)

มีความสัมพันธ์กับความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ กระดาษที่มีความเรียบดี การกระจายตัวของเนื้อกระดาษจะสม่ำเสมอ ทำการวัดความเรียบของกระดาษด้วยเครื่องวัดความเรียบของกระดาษ ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 แสดงเครื่องวัดความเรียบของกระดาษ (smoothness tester)



### 3.2.8.5 ความขาวสว่าง (brightness)

ในวงการกระดาษความขาวสว่างเป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน 457 นาโนเมตร สาเหตุที่เลือกใช้ช่วงแสงสีน้ำเงินในการวัดค่าความขาวสว่างนั้น เป็นเพราะตามนุษย์และทางด้านจิตวิทยานั้นชอบสีน้ำเงินมากกว่าสีอื่นๆ เมื่อสิ่งของเริ่มแก่ก็มีสีเหลืองปนในสีเดิม ดังนั้นสีน้ำเงินที่เป็นคู่สีตรงข้ามของสีเหลืองที่แสดงถึงความใหม่จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยทั่วไปเยื่อกระดาษที่ไม่ได้ฟอกส่วนมากจะมีสีน้ำตาลเข้มถึงสีเหลืองอ่อน อันเนื่องจากลิกนินดูดซับแสงสีน้ำเงินเอาไว้ ทำให้ค่าการสะท้อนแสงที่ได้ในช่วงแสงสีน้ำเงินมีค่าต่ำ แต่เมื่อนำเยื่อไปฟอกโดยวิธีการขจัดลิกนินหรือเปลี่ยนโครงสร้างลิกนิน เยื่อฟอกขาวที่ได้จะให้ค่าการสะท้อนแสงสีน้ำเงินสูงมากขึ้น การฟอกเยื่อจึงเป็นการเพิ่มสีน้ำเงินให้กับกระดาษ อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บกระดาษเป็นเวลานาน จะเกิดการเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อ (brightness reversion) ซึ่งเกิดจากปัจจัยทางเคมีในตัวเยื่อและปัจจัยทางด้านกายภาพภายนอก เช่น ความชื้นและความร้อน เป็นต้น

ทำการวัดความขาวสว่างของแผ่นทดสอบด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง Technidyne color touch PC ดังแสดงในภาพที่ 3-13 ตามมาตรฐาน TAPPI T525 om-02 [53] โดยทำการวัดค่าทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น และในแต่ละแผ่นจะวัด 5 ตำแหน่ง วัดทั้งในแบบที่มีแผ่นทดสอบชนิดเดียวกันรองด้านหลังหลายแผ่น และแบบที่รองด้านหลังแผ่นทดสอบด้วยวัตถุสีดำ



ภาพที่ 3-13 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ Technidyne color touch PC

### 3.2.8.6 ความทึบแสง (opacity)

ความทึบแสงของกระดาษเป็นสมบัติที่จำเป็นสำหรับกระดาษพิมพ์เขียน โดยเป็นการวัดความสามารถในการให้แสงทะลุผ่านแผ่นทดสอบ แผ่นทดสอบที่มีความทึบแสงสูง จะมีการทะลุผ่านของแสงน้อย ความทึบแสงและความขาวสว่างต่างก็ขึ้นกับปัจจัย 2 ประการ คือ การกระเจิงแสงและการดูดซับแสง เยื่อที่มีความขาวสว่างสูงมาก อาจมีปัญหาด้านความทึบแสง เพราะเยื่อจะมีความทึบแสงน้อยลง

การวัดความทึบแสงสามารถทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง เครื่องเดียวกับการวัดหาค่าความขาวสว่าง โดยทำการวัดตามมาตรฐาน TAPPI T 519 om-02 [54] วัดความทึบแสงของแผ่นทดสอบแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น โดยในแต่ละแผ่นจะวัด 5 ตำแหน่ง

### 3.2.8.7 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength)



ภาพที่ 3-14 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength tester)

ความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็นค่าแรงสูงสุดที่แผ่นทดสอบจะทนได้ก่อนที่แผ่นทดสอบจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง

ดังแสดงในภาพที่ 3-14 ตามมาตรฐานของ TAPPI T 494 om-01 [55] โดยในแต่ละภาวะจะทำการทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) โดยใช้สูตร

$$\text{Tensile index} = \frac{\text{Tensile strength}}{\text{Basis weight}}$$

โดยค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น Nm/g

### 3.2.8.8 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance)



ภาพที่ 3-15 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (elmendorf tearing resistance tester)

ความต้านทานแรงฉีกเป็นความสามารถของแผ่นทดสอบที่จะต้านแรงที่ใช้ในการฉีกแผ่นทดสอบต่อจากแนวตัดเริ่มต้น หน่วยที่วัดได้เป็นมิลลินิวตัน (mN) วัดโดยใช้เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีกดังแสดงในภาพที่ 3-15 โดยใช้วิธีแบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [56] ในแต่ละภาวะจะทำการทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แต่ละแผ่นสามารถนำมาหาค่าความต้านทานแรงฉีกได้ 2 ครั้ง จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) โดยใช้สูตร

$$\text{Tear index} = \frac{\text{Tear strength}}{\text{Basis weight}}$$

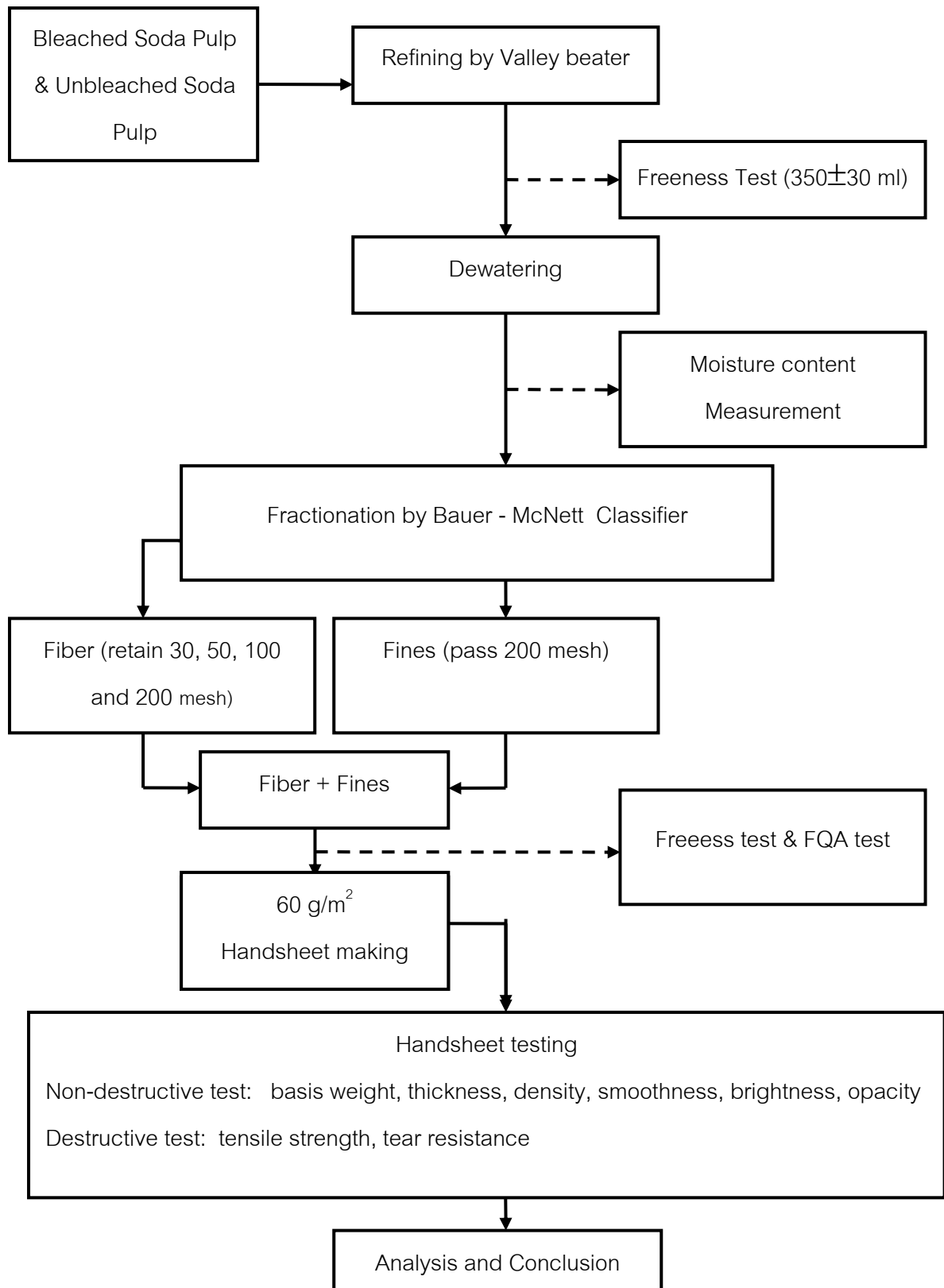
โดยค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีหน่วยเป็น  $\text{mN m}^2/\text{g}$

### 3.2.9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำค่าสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบมาทำการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดไฟน์ ชนิดเยื่อ และปริมาณไฟน์ ที่ส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษซึ่งได้แก่ ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ ลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใย สมบัติด้านความแข็งแรงต่างๆ รวมทั้งค่าสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ

ภาพรวมของการทดลองในงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ในแผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในภาพที่ 3-16

แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 3-16 แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน

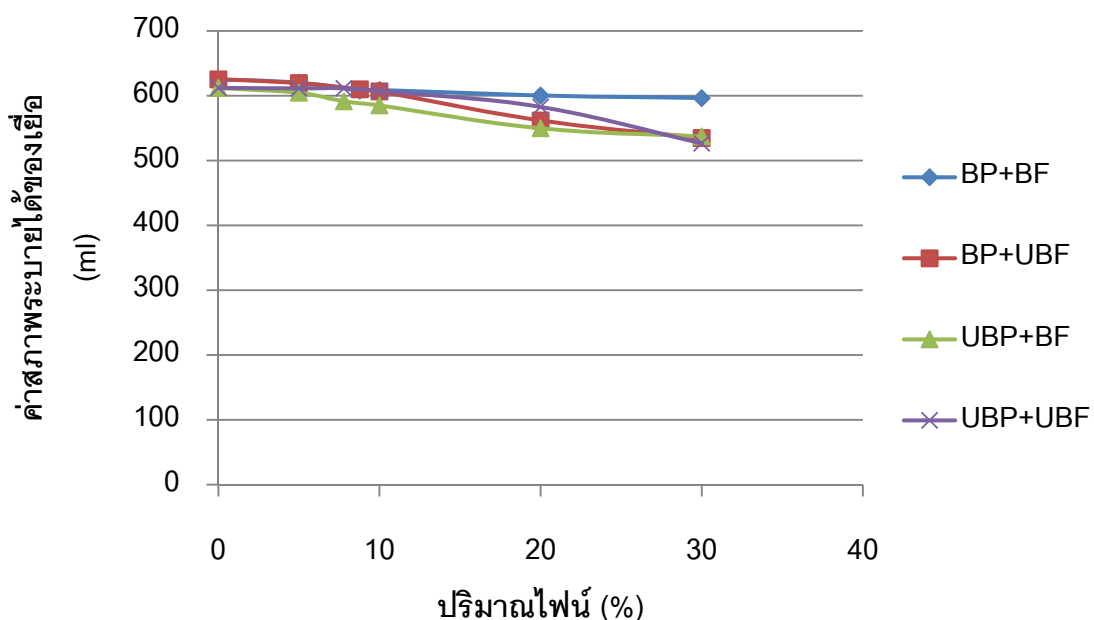
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

ตารางที่ 4-1 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าสภาพระบายได้

ปริมาณไฟน์ (%)	ค่าสภาพระบายได้ (ml)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) ±SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) ±SD
0	625.25 ± 1.658	625.25 ± 1.658	612.00 ± 5.354	612.00 ± 5.354
5	620.25 ± 6.131	619.50 ± 7.188	604.63 ± 7.825	611.25 ± 10.973
7.79	-	-	591.25 ± 6.994	611.38 ± 3.945
8.78	608.00 ± 7.106	610.00 ± 2.449	-	-
10	608.75 ± 8.529	606.75 ± 9.464	585.00 ± 6.633	607.00 ± 7.778
20	600.25 ± 10.137	561.75 ± 7.588	549.63 ± 5.250	582.75 ± 10.904
30	596.25 ± 5.252	534.75 ± 11.765	537.13 ± 16.002	526.50 ± 4.796



ภาพที่ 4-1 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าสภาพระบายได้

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-1 พบว่า อิทธิพลของปริมาณไฟนมีผลต่อค่าสภาพระบายน้ำได้ค่อนข้างมาก เพราะการเพิ่มปริมาณไฟนให้สูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นไฟนชนิดฟอกหรือไฟนไม่ฟอกก็ตามในเยื่อชนิดฟอกและไม่ฟอก ทำให้ค่าสภาพระบายน้ำได้ของเยื่อมีค่าลดต่ำลง โดยปริมาณไฟนตั้งแต่ร้อยละ 10 พบว่าค่าสภาพระบายน้ำได้ลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไฟนทำให้ในระบบมีเส้นใยสั้นๆ มากขึ้น ซึ่งเส้นใยสั้นๆ จะมีพื้นที่ผิวในการอุ้มน้ำมากกว่าเส้นใยยาว จึงส่งผลให้น้ำสามารถระบายออกมาได้น้อยลง ค่าสภาพระบายน้ำได้ของเยื่อจึงลดลง [10]

พิจารณาเยื่อกับไฟนที่ต่างชนิดกัน (UBP+BF และ BP+UBF) เยื่อไม่ฟอกจะมีลิกนินมาก มีความไม่ชอบน้ำมาก เยื่อน่าจะมีค่าสภาพระบายน้ำได้สูง แต่เมื่อมีการใส่ไฟนฟอกในเยื่อไม่ฟอก ทำให้ค่าสภาพระบายน้ำได้ลดลง เนื่องจากไฟนฟอกมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเยื่อไม่ฟอก ไฟนฟอกจึงสามารถช่วยอุ้มน้ำไว้ได้ส่วนหนึ่ง ค่าสภาพระบายน้ำได้จึงลดต่ำลง เหตุผลเดียวกันสามารถใช้อธิบายในกรณีของเยื่อฟอกผสมกับไฟนไม่ฟอก กล่าวคือ เยื่อฟอกมีลิกนินน้อย สามารถอุ้มน้ำไว้ได้มาก จึงมีค่าสภาพระบายน้ำได้ต่ำ แต่เมื่อใส่ไฟนไม่ฟอกลงในเยื่อฟอก ไฟนไม่ฟอกมีลิกนินมากกว่าจึงส่งผลให้ดึงค่าสภาพระบายน้ำได้ขึ้นมาให้สูงกว่าเดิม

พิจารณาที่เยื่อกับไฟนชนิดเดียวกัน (BP+BF และ UBP+UBF) เยื่อฟอกผสมไฟนฟอกควรมีค่าสภาพระบายน้ำได้ต่ำกว่าเยื่อไม่ฟอกผสมไฟนไม่ฟอก เพราะเยื่อฟอกและไฟนฟอกมีปริมาณลิกนินน้อยกว่า จึงน่าจะอุ้มน้ำได้มากกว่าเยื่อไม่ฟอกและไฟนไม่ฟอก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยและปริมาณไฟน ซึ่งเป็นไฟนในส่วนที่มีขนาด 0.07-0.20 มิลลิเมตร ในเยื่อผสมทั้งสอง (หัวข้อ 4.2 และหัวข้อ 4.3 ตามลำดับ) ซึ่งหาได้จากการนำเยื่อผสมทั้งสองไปวิเคราะห์สมบัติของเยื่อโดยใช้เครื่องวัดลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย พบว่าเยื่อฟอกผสมไฟนฟอกมีค่าความยาวเส้นใยต่ำกว่าและมีปริมาณไฟนสูงกว่าเยื่อไม่ฟอกผสมกับไฟนไม่ฟอก ซึ่งควรส่งผลให้เยื่อฟอกผสมไฟนฟอกมีค่าสภาพระบายน้ำได้ต่ำกว่าเยื่อไม่ฟอกผสมไฟนไม่ฟอก อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 4-1 พบว่าผลที่ได้ไม่เป็นดังนั้น เพราะเยื่อฟอกไฟนฟอกกลับมีค่าสภาพระบายน้ำได้ที่สูงกว่าเยื่อไม่ฟอกไฟนไม่ฟอก

เมื่อนำค่าสภาพระบายน้ำได้ของเยื่อที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA : 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่าปริมาณไฟน (A) ชนิดเยื่อ (B) และชนิดไฟน (C) ส่งผลต่อค่าสภาพระบายน้ำได้ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (P-value ของปริมาณไฟน์และชนิดเยื่อเท่ากับ 0.000 ส่วน P-value ของชนิดไฟน์เท่ากับ 0.007)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.001 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อค่าสภาพระบายนได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) ด้วยเช่นกัน

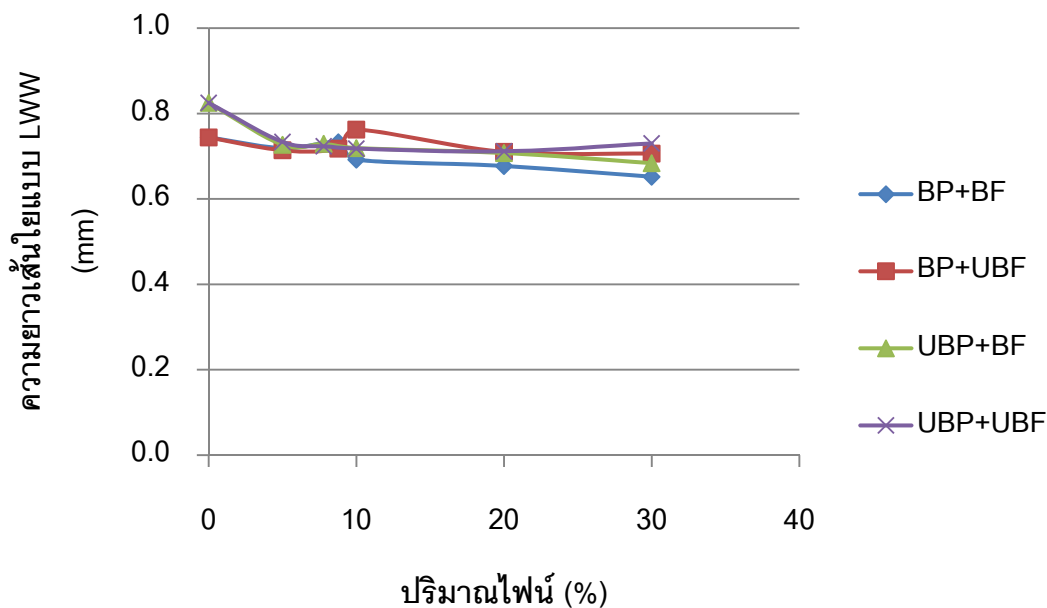
#### 4.2 ความยาวของเส้นใย (fiber length)

ตารางที่ 4-2 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความยาวเส้นใย (LWW)

ปริมาณไฟน์ (%)	ความยาวเส้นใย (mm)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) $\pm$ SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) $\pm$ SD
0	0.744 $\pm$ 0.003	0.744 $\pm$ 0.003	0.825 $\pm$ 0.094	0.825 $\pm$ 0.094
5	0.719 $\pm$ 0.007	0.714 $\pm$ 0.018	0.727 $\pm$ 0.004	0.734 $\pm$ 0.007
7.79	-	-	0.729 $\pm$ 0.002	0.723 $\pm$ 0.005
8.78	0.733 $\pm$ 0.027	0.718 $\pm$ 0.009	-	-
10	0.692 $\pm$ 0.005	0.762 $\pm$ 0.020	0.719 $\pm$ 0.011	0.718 $\pm$ 0.015
20	0.677 $\pm$ 0.009	0.710 $\pm$ 0.007	0.708 $\pm$ 0.012	0.711 $\pm$ 0.011
30	0.652 $\pm$ 0.009	0.706 $\pm$ 0.013	0.684 $\pm$ 0.010	0.730 $\pm$ 0.010

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-2 และภาพที่ 4-2 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์สูงขึ้น ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณไฟน์สูงขึ้นทำให้ความยาวเส้นใยเฉลี่ยในระบบลดลง เยื่อที่ไม่ฟอกจะมีความยาวเส้นใยที่มากกว่าเยื่อที่ฟอก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการฟอกเยื่อนั้น สารฟอกเยื่ออาจเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใย จึงอาจส่งผลให้เส้นใยมีความยาวสั้นลง อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าไฟน์ไม่ฟอกส่งผลให้เยื่อผสมมีค่าความยาวเส้นใยมากกว่าไฟน์ฟอกในอัตราส่วนเดียวกันและเมื่อผสมลงในเยื่อชนิดเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ไฟน์ฟอกอาจมีขนาดของเส้นใยเล็กกว่าหรือสั้นกว่าไฟน์ไม่ฟอก โดยอาจเนื่องมาจากอิทธิพลของการฟอกเยื่อจึงส่งผลทำให้การผสมไฟน์ฟอกลงไปจึงมีแนวโน้มทำให้ค่าความยาวเส้นใยลดลง





ภาพที่ 4-2 ผลของปริมาณไผ่ ชนิดไผ่ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าความยาวเส้นใยแบบ LWW

เมื่อนำค่าความยาวเส้นใยที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA : 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไผ่ (A) ชนิดเยื่อ (B) และชนิดไผ่ (C) ส่งผลต่อค่าความยาวเส้นใยของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (P-value ของปริมาณไผ่และชนิดเยื่อเท่ากับ 0.000 ส่วน P-value ของชนิดไผ่เท่ากับ 0.004)

ในส่วนของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไผ่กับชนิดเยื่อ (A\*B) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.003 ก็ส่งผลต่อค่าความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) ด้วยเช่นกัน ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอื่นๆ นั้น ไม่ส่งผลต่อค่าความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มากกว่า 0.05

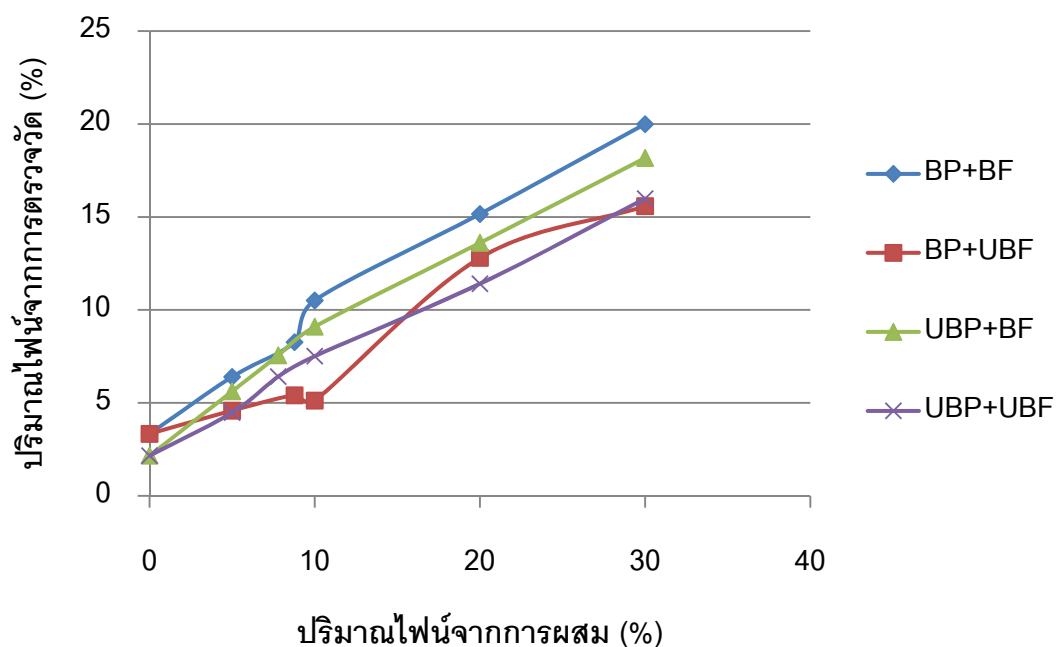
#### 4.3 ปริมาณไผ่ (fines content)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-3 พบว่า เมื่อใส่ปริมาณไผ่สูงขึ้นตามระดับที่กำหนด แนวน้ำของปริมาณไผ่ที่วัดได้ก็เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณไผ่ที่ตรวจพบเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยกับปริมาณไผ่ที่ใส่ลงไปจริงนั้นมีความแตกต่าง

กันเล็กน้อย เนื่องจากเครื่องวัดลักษณะฐานฐานวิทยาของเส้นใยจะอ่านค่าของขนาดไฟน์ที่ 0.07-0.20 มิลลิเมตร รวมถึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากการที่ผู้ทดสอบสูมตักน้ำเยื่อขึ้นมาวัด

ตารางที่ 4-3 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าปริมาณไฟน์จากการตรวจวัด

ปริมาณไฟน์ (%)	ปริมาณไฟน์จากการตรวจวัด (%)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก
	(BP+BF) ±SD	(BP+UBF) ±SD	(UBP+BF) ±SD	(UBP+UBF) ±SD
0	3.335 ± 0.308	3.335 ± 0.308	2.162 ± 0.280	2.162 ± 0.280
5	6.398 ± 0.248	4.584 ± 0.369	5.622 ± 0.567	4.478 ± 0.483
7.79	-	-	7.556 ± 0.342	6.414 ± 0.359
8.78	8.269 ± 0.778	5.409 ± 0.456	-	-
10	10.509 ± 0.442	5.123 ± 0.325	9.098 ± 0.787	7.514 ± 1.289
20	15.161 ± 0.674	12.799 ± 0.536	13.609 ± 0.811	11.405 ± 0.758
30	19.993 ± 1.332	15.583 ± 2.026	18.173 ± 1.267	15.989 ± 0.478



ภาพที่ 4-3 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าปริมาณไฟน์จากการตรวจวัด

เป็นที่น่าสังเกตว่าชนิดของไฟน์มีบทบาทต่อปริมาณไฟน์ที่ตรวจวัดได้ กล่าวคือ ที่อัตราส่วนผสมปริมาณไฟน์เท่ากัน เยื่อที่มีการผสมไฟน์ฟอกนั้นปริมาณไฟน์ที่ตรวจพบจะมากกว่า เยื่อที่ผสมไฟน์ไม่ฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไฟน์ฟอกมีความละเอียดและมีส่วนของเส้นใยที่ขนาดเล็กๆ จำนวนมากกว่าไฟน์ไม่ฟอก โดยอาจเกิดจากปฏิกิริยาของสารฟอกเยื่อกับเส้นใยในระหว่างการฟอกเยื่อ ในส่วนผลของชนิดเยื่อนั้น พบว่า เยื่อไม่ฟอกมีแนวโน้มที่ให้ค่าปริมาณไฟน์ที่ตรวจพบได้ต่ำกว่าเยื่อฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเยื่อไม่ฟอกมีความยาวเส้นใยสูงกว่าและมีปริมาณไฟน์เริ่มต้นต่ำกว่าเยื่อฟอก (พิจารณาจากค่าปริมาณไฟน์ที่ร้อยละ 0)

เมื่อนำค่าปริมาณไฟน์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA : 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) ชนิดเยื่อ (B) และชนิดไฟน์ (C) ส่งผลต่อค่าปริมาณไฟน์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (P-value ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ เท่ากับ 0.000, 0.001 และ 0.000 ตามลำดับ)

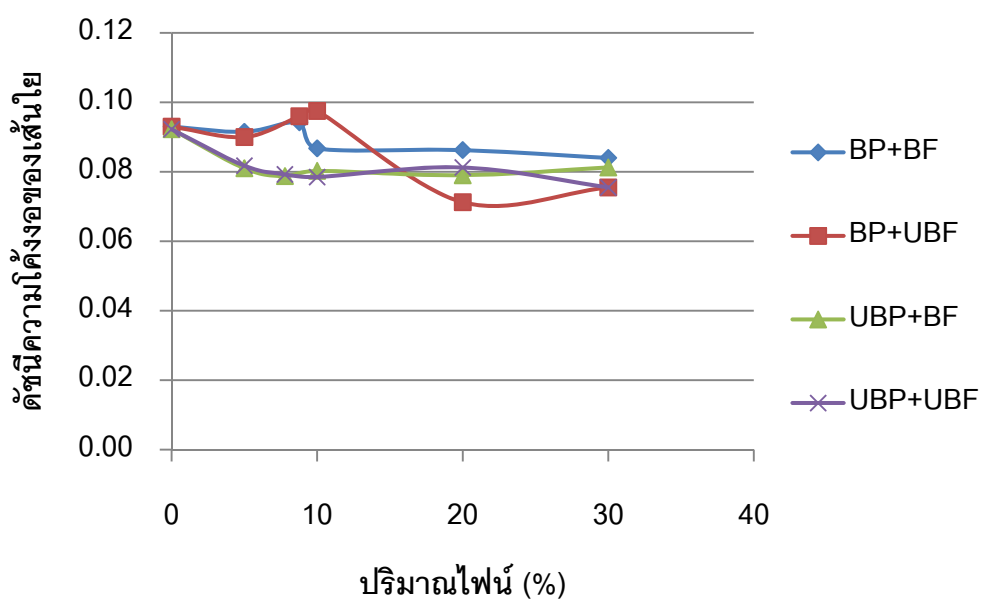
ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้น พบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.014 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.007 แสดงว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งแบบระหว่าง 2 ตัวแปร และแบบ 3 ตัวแปร ต่างมีผลต่อค่าปริมาณไฟน์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ )

#### 4.4 ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (Curl index)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-4 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์สูงขึ้น ค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากเส้นใยมีความยาวเฉลี่ยในระบบลดลง การที่เส้นใยมีความยาวลดลง โอกาสเกิดความโค้งงอจึงน้อยลง [42] ในส่วนผลของชนิดเยื่อนั้นพบว่า เยื่อฟอกมีแนวโน้มให้ค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยมากกว่าในเยื่อไม่ฟอกโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการนำไฟน์มาผสม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในเยื่อฟอกมีปริมาณลิกนินที่น้อยกว่า เส้นใยมีความชอบน้ำมากกว่า ทำให้ความสามารถอุ้มน้ำมากกว่า โอกาสเกิดการโค้งงอของเส้นใยจึงมากกว่า ส่วนในเยื่อไม่ฟอกนั้น มีปริมาณลิกนินที่มากกว่า ทำให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำมากกว่า กล่าวคือ เส้นใยมีความแกร่งมากกว่านั่นเอง จึงอาจส่งผลให้เยื่อไม่ฟอกมีโอกาสเกิดความโค้งงอน้อยกว่าเยื่อฟอก

ตารางที่ 4-4 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใย

ปริมาณไฟน์ (%)	ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก
	(BP+BF) ±SD	(BP+UBF) ±SD	(UBP+BF) ±SD	(UBP+UBF) ±SD
0	0.093 ± 0.004	0.093 ± 0.004	0.092 ± 0.012	0.092 ± 0.012
5	0.092 ± 0.004	0.090 ± 0.002	0.081 ± 0.001	0.082 ± 0.002
7.79	-	-	0.079 ± 0.003	0.079 ± 0.002
8.78	0.094 ± 0.009	0.096 ± 0.003	-	-
10	0.087 ± 0.003	0.098 ± 0.002	0.080 ± 0.002	0.079 ± 0.005
20	0.086 ± 0.005	0.071 ± 0.002	0.079 ± 0.002	0.081 ± 0.002
30	0.084 ± 0.004	0.076 ± 0.002	0.081 ± 0.003	0.076 ± 0.003



ภาพที่ 4-4 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใย

ส่วนอิทธิพลของชนิดไฟน์นั้นพบว่า มีผลต่อค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยน้อยมาก โดยจะสังเกตเห็นผลเมื่อมีการใส่ปริมาณไฟน์มากในระดับหนึ่ง โดยการเติมไฟน์ไม่ฟอกในเยื่อฟอกมีแนวโน้มที่ให้ค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยลดลงมากกว่าการเติมไฟน์ฟอก เช่นเดียวกันกับการเติมไฟน์ไม่ฟอกในเยื่อไม่ฟอก ซึ่งก็ให้แนวโน้มของค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยลดลงมากกว่า

การเติมไฟน์ฟอกในเยื่อไม่ฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณลิกนินที่มีอยู่ในไฟน์ไม่ฟอก ส่งผลให้เส้นใยมีความแกร่งมากกว่าไฟน์ที่ฟอก จึงทำให้ค่าดัชนีความโค้งงอมีแนวโน้มที่ลดลงมากกว่า

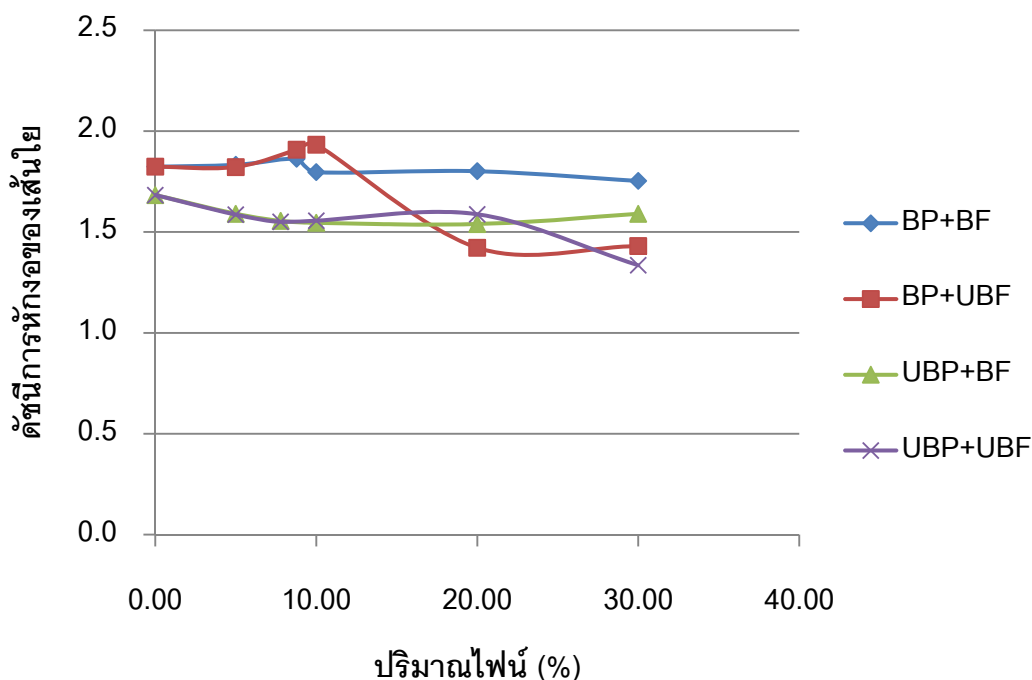
เมื่อนำค่าดัชนีความโค้งงอที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และ ชนิดเยื่อ (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 มีผลต่อค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนชนิดไฟน์ (C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.075 ซึ่งไม่มีผลต่อค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) ค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) ค่า P-value เท่ากับ 0.004 และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) ค่า P-value เท่ากับ 0.001 ที่ส่งผลต่อค่าความโค้งงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

#### 4.5 ดัชนีการหักงอของเส้นใย (kink index)

ตารางที่ 4-5 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อดัชนีการหักงอของเส้นใย

ปริมาณไฟน์ (%)	ดัชนีการหักงอของเส้นใย			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) $\pm$ SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) $\pm$ SD
0	1.824 $\pm$ 0.031	1.824 $\pm$ 0.031	1.683 $\pm$ 0.085	1.683 $\pm$ 0.085
5	1.833 $\pm$ 0.054	1.822 $\pm$ 0.020	1.590 $\pm$ 0.050	1.586 $\pm$ 0.020
7.79	-	-	1.555 $\pm$ 0.074	1.550 $\pm$ 0.016
8.78	1.863 $\pm$ 0.112	1.908 $\pm$ 0.031	-	-
10	1.797 $\pm$ 0.071	1.933 $\pm$ 0.038	1.546 $\pm$ 0.060	1.556 $\pm$ 0.067
20	1.802 $\pm$ 0.057	1.422 $\pm$ 0.006	1.539 $\pm$ 0.023	1.588 $\pm$ 0.021
30	1.754 $\pm$ 0.039	1.431 $\pm$ 0.030	1.590 $\pm$ 0.063	1.335 $\pm$ 0.022



ภาพที่ 4-5 ผลของปริมาณไฟเบอร์ ชนิดไฟเบอร์ และชนิดเยื่อที่มีต่อดัชนีการหักงอของเส้นใย

ผลการทดลองที่ได้จากดัชนีการหักงอของเส้นใยนั้นค่อนข้างสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับความโค้งงอของเส้นใย จากผลการทดลองในตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-5 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไฟเบอร์ให้สูงขึ้น ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง จะเห็นการเปลี่ยนแปลงชัดเจนเมื่อปริมาณไฟเบอร์มากกว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเนื่องจากเส้นใยมีความยาวเฉลี่ยในระบบลดลง การที่เส้นใยมีความยาวลดลง ดัชนีการหักงอของเส้นใยจึงอาจลดลง เมื่อเทียบกับเส้นใยที่มีขนาดยาวกว่า เพราะเส้นใยยาวมีโอกาสที่จะเกิดการหักงอมากกว่าเส้นใยสั้น ดังนั้นการที่มีปริมาณไฟเบอร์เพิ่มซึ่งส่งผลให้ความยาวเส้นใยโดยเฉลี่ยในระบบลด ดัชนีการหักงอของเส้นใยจึงลดลง จากการทดลองยังพบว่าเยื่อฟอกไม่ว่าจะผสมไฟเบอร์ชนิดใดก็ตามจะมีค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยมากกว่าเยื่อไม่ฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในเยื่อฟอกมีปริมาณลิกนินที่น้อยกว่า เส้นใยมีความชอบน้ำมากกว่า ทำให้ความสามารถอุ้มน้ำมากกว่า โอกาสเกิดการหักงอของเส้นใยจึงมากกว่า ส่วนในเยื่อไม่ฟอกนั้น มีปริมาณลิกนินที่มากกว่า ทำให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำมากกว่า กล่าวคือ เส้นใยมีความแกร่งมากกว่านั่นเอง จึงอาจส่งผลให้เยื่อไม่ฟอกมีโอกาสเกิดการหักงอได้น้อยกว่า การเติมไฟเบอร์ไม่ฟอกลงในเยื่อมีแนวโน้มให้ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยลดลงมากกว่าการเติมไฟเบอร์ฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณลิกนินที่มีอยู่ในไฟเบอร์ไม่ฟอก ส่งผลให้เส้นใยมีความแกร่งมากกว่าไฟเบอร์ฟอก จึงทำให้ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มที่ลดลงมากกว่า

เมื่อนำค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ชนิดเยื่อ (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และชนิดไฟน์ (C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 มีผลต่อค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05

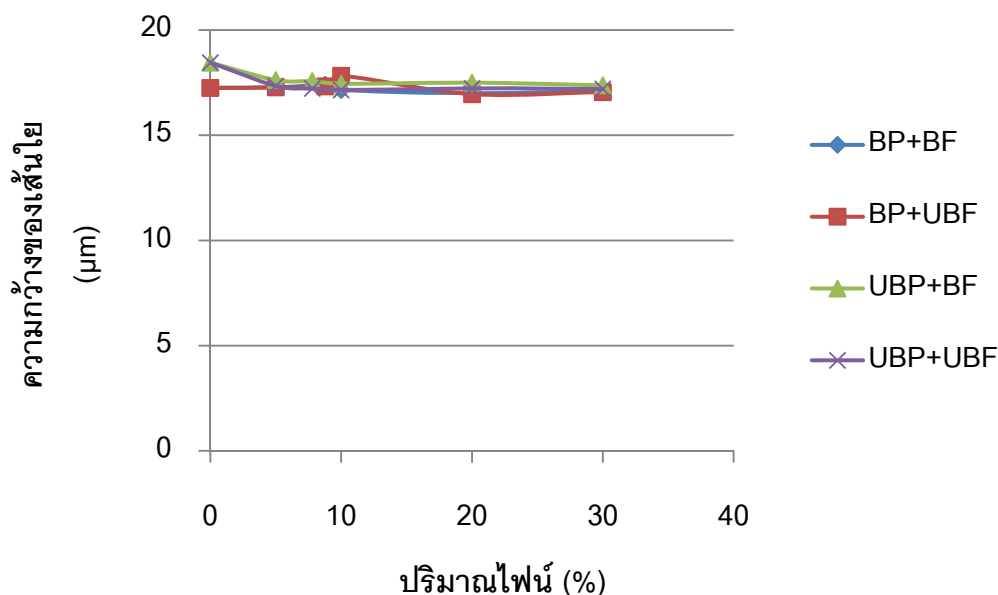
ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.001 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ก็ส่งผลต่อค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ด้วยเช่นกัน

#### 4.6 ความกว้างของเส้นใย (fiber width)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-6 พบว่า ชนิดของเยื่อและปริมาณไฟน์มีผลต่อความกว้างของเส้นใย โดยเยื่อไม่ฟอกมีความกว้างของเส้นใยมากกว่าเยื่อฟอกเล็กน้อย การเพิ่มปริมาณไฟน์มากขึ้นส่งผลให้ความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงแต่ไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มปริมาณไฟน์ให้มากขึ้น เป็นการเพิ่มเส้นใยขนาดเล็กๆ ในระบบ จึงส่งผลให้ความกว้างของเส้นใยโดยเฉลี่ยลดลง

ตารางที่ 4-6 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความกว้างของเส้นใย

ปริมาณไฟน์ (%)	ความกว้างของเส้นใย ( $\mu\text{m}$ )			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) $\pm$ SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) $\pm$ SD
0	17.250 $\pm$ 0.058	17.250 $\pm$ 0.058	18.450 $\pm$ 0.947	18.450 $\pm$ 0.947
5	17.275 $\pm$ 0.222	17.275 $\pm$ 0.150	17.625 $\pm$ 0.096	17.350 $\pm$ 0.129
7.79	-	-	17.575 $\pm$ 0.171	17.225 $\pm$ 0.171
8.78	17.400 $\pm$ 0.258	17.325 $\pm$ 0.171	-	-
10	17.150 $\pm$ 0.129	17.825 $\pm$ 0.330	17.450 $\pm$ 0.208	17.150 $\pm$ 0.129
20	17.000 $\pm$ 0.115	16.950 $\pm$ 0.129	17.500 $\pm$ 0.082	17.225 $\pm$ 0.126
30	17.100 $\pm$ 0.163	17.050 $\pm$ 0.238	17.375 $\pm$ 0.096	17.200 $\pm$ 0.082



ภาพที่ 4-6 ผลของปริมาณไฟเบอร์ ชนิดไฟเบอร์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความกว้างของเส้นใย

เมื่อนำค่าความกว้างของเส้นใยที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟเบอร์ (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และชนิดเยื่อ (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 มีผลต่อค่าความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แต่ชนิดไฟเบอร์ (C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.549 ไม่ส่งผลต่อค่าความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

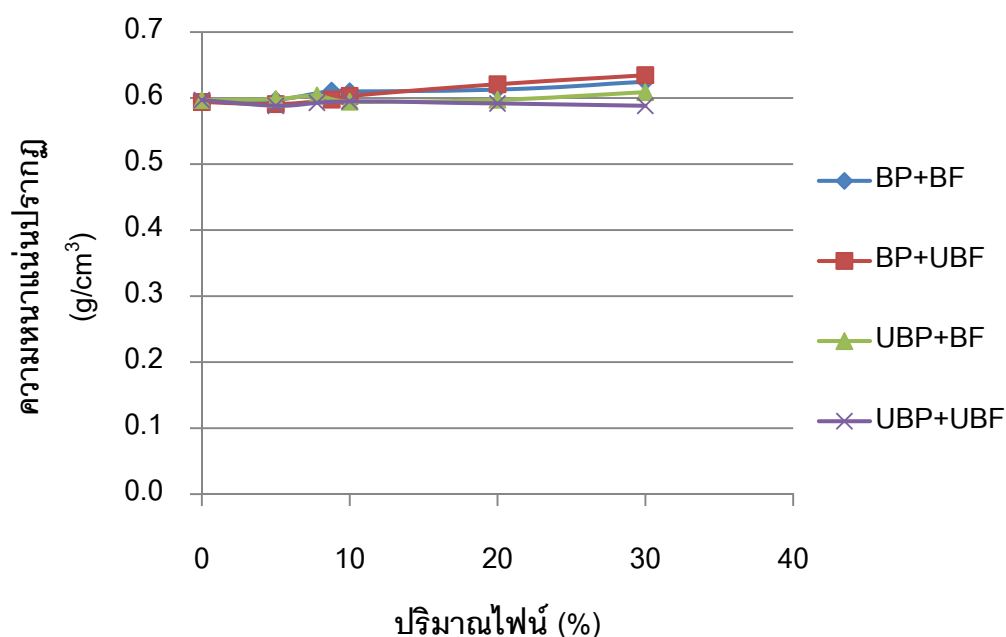
ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า มีเพียงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟเบอร์กับชนิดเยื่อ (A\*B) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟเบอร์ (B\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.036 ที่ส่งผลต่อค่าความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05



#### 4.7 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)

ตารางที่ 4-7 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏ

ปริมาณไฟน์ (ร้อยละ)	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm <sup>3</sup> )			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) ±SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) ±SD
0	0.594 ± 0.013	0.594 ± 0.013	0.597±0.006	0.597±0.006
5	0.597 ± 0.010	0.591 ± 0.008	0.598±0.007	0.588±0.015
7.79	-	-	0.604±0.011	0.593±0.012
8.78	0.611 ± 0.006	0.598 ± 0.007	-	-
10	0.610 ± 0.008	0.603 ± 0.009	0.594±0.007	0.595±0.013
20	0.613 ± 0.007	0.621 ± 0.005	0.597±0.011	0.592±0.020
30	0.625 ± 0.011	0.635 ± 0.015	0.609±0.017	0.588±0.007



ภาพที่ 4-7 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏ

ความหนาแน่นปรากฏของกระดาษคำนวณได้จากการนำค่าน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษมาหารด้วยความหนาของกระดาษ ซึ่งการแนบตัวกันของเส้นใยหรือการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษ ถ้าเส้นใยมีการแนบตัวกันดี จะทำให้การ

สร้างพันธะระหว่างเส้นใยดี กระดาษจะมีความหนาแน่นปรากฏมาก และเมื่อพิจารณาถึงค่าดัชนีความโค้งของเส้นใยพบว่า แนวโน้มค่าดัชนีความโค้งของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง เมื่อเส้นใยในระบบมีความยาวที่สั้นลง โอกาสเกิดความโค้งลดลง กระดาษมีความฟูลดลงกระดาษจึงมีความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นมา [27]

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-13 และภาพที่ 4-7 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์ให้มากขึ้น ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบในทุกกรณีมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากไฟน์มีขนาดเล็กจึงอาจเข้าไปแทรกช่องว่างของเส้นใย จึงทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [44, 46] เมื่อพิจารณาที่จุดๆ เดียวกันของค่าดัชนีความโค้งกับค่าความหนาแน่นปรากฏ เมื่อค่าดัชนีความโค้งของเส้นใยลดลง ค่าความหนาแน่นปรากฏก็จะเพิ่มขึ้น ถ้าค่าดัชนีความโค้งของเส้นใยมาก เส้นใยจะไม่แนบชิด กระดาษจะฟู [27] ทั้งนี้ในเยื่อฟอกจะให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าเยื่อไม่ฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเยื่อฟอกมีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเยื่อไม่ฟอก จึงอาจมีผลทำให้การแนบชิดกันของเส้นใยดีกว่าเยื่อไม่ฟอก ความหนาแน่นปรากฏจึงสูงกว่าเยื่อไม่ฟอก ส่วนชนิดของไฟน์นั้นดูเหมือนว่าไฟน์ฟอกมีแนวโน้มให้ค่าความหนาแน่นปรากฏสูงกว่าไฟน์ไม่ฟอก เนื่องจากมีปริมาณลิกนินน้อยกว่า จึงอาจทำให้การแนบชิดกันระหว่างเส้นใยมีมากกว่า ความหนาแน่นปรากฏจึงสูงกว่า แต่ผลจากชนิดไฟน์นั้นไม่ชัดเจนเท่ากับชนิดเยื่อ

เมื่อนำค่าความหนาแน่นปรากฏที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA:  $6 \times 2 \times 2$  factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และชนิดเยื่อ (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 มีผลต่อค่าความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 หากแต่ชนิดไฟน์ (C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.056 ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

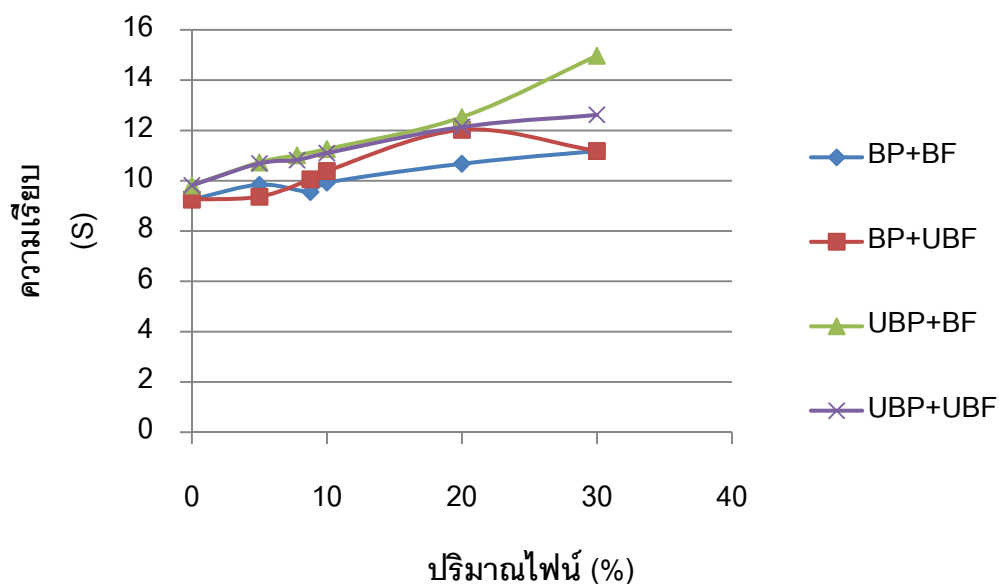
ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.011 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.002 ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แต่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.272 ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่น

ปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

#### 4.8 ความเรียบ (smoothness)

ตารางที่ 4-8 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความเรียบ

ปริมาณไฟน์ (ร้อยละ)	ความเรียบ (s)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) $\pm$ SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) $\pm$ SD
0	9.250 $\pm$ 0.341	9.250 $\pm$ 0.341	9.818 $\pm$ 0.524	9.818 $\pm$ 0.524
5	9.843 $\pm$ 0.474	9.366 $\pm$ 0.480	10.730 $\pm$ 0.496	10.688 $\pm$ 0.599
7.79	-	-	11.013 $\pm$ 0.415	10.825 $\pm$ 0.480
8.78	9.553 $\pm$ 0.520	10.056 $\pm$ 0.423	-	-
10	9.925 $\pm$ 0.548	10.388 $\pm$ 0.424	11.261 $\pm$ 0.546	11.103 $\pm$ 0.567
20	10.678 $\pm$ 0.509	12.026 $\pm$ 0.781	12.531 $\pm$ 0.762	12.145 $\pm$ 0.921
30	11.185 $\pm$ 0.656	13.213 $\pm$ 0.739	14.970 $\pm$ 0.540	12.621 $\pm$ 0.491



ภาพที่ 4-8 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความเรียบ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-8 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์ให้สูงขึ้น พบว่ากระดาษมีความเรียบสูงขึ้น เพราะไฟน์มีขนาดเล็กจึงสามารถเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเส้นใย [30] ส่วนชนิดของเยื่อมีผลต่อความเรียบน้อยกว่าปริมาณไฟน์ พบว่าปริมาณไฟน์ และชนิดไฟน์มีผลต่อเยื่อไม่ฟอกโดยความเรียบเพิ่มขึ้นชัดเจนที่ปริมาณไฟน์ร้อยละ 20 ส่วนในเยื่อฟอกนั้น ปริมาณไฟน์ และชนิดไฟน์จะมีผลให้ความเรียบเพิ่มขึ้นชัดเจนที่ปริมาณไฟน์ร้อยละ 10 และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใย พบว่าที่ปริมาณไฟน์เดียวกัน หากเยื่อผสมมีค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยน้อย ค่าความเรียบของกระดาษจะมีความเรียบมากขึ้น เมื่อดูชนิดของเยื่อ เยื่อไม่ฟอกมีค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยน้อยกว่าเยื่อฟอก จึงส่งผลให้เยื่อไม่ฟอกมีความเรียบมากกว่าเยื่อฟอก

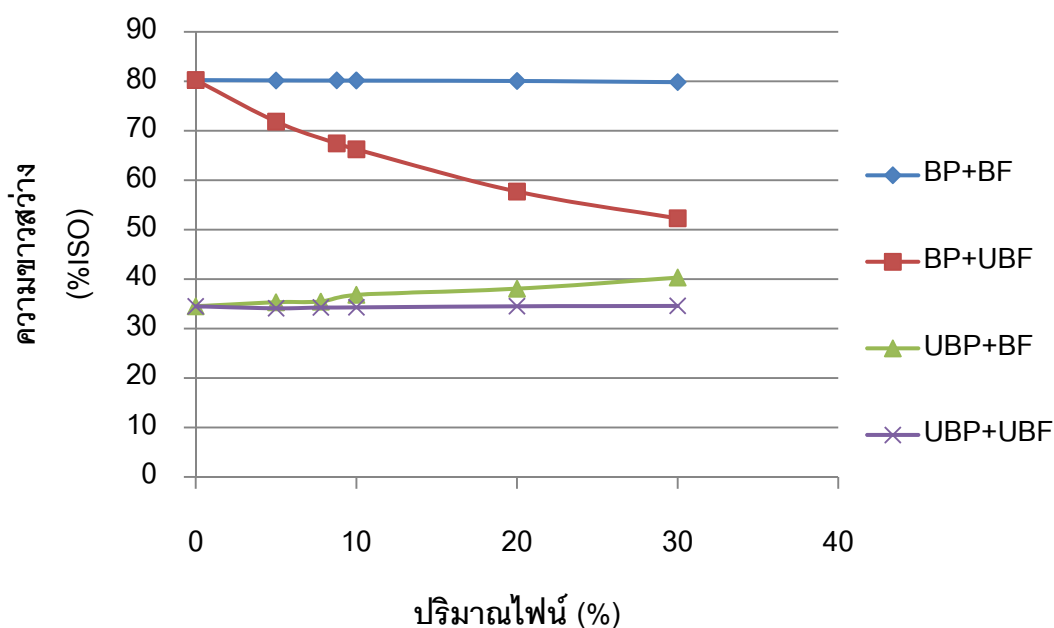
เมื่อนำค่าความเรียบที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA:  $6 \times 2 \times 2$  factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และ ชนิดเยื่อ (B) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 มีผลต่อค่าความเรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 หากแต่ชนิดไฟน์ (C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.602 ไม่ส่งผลต่อค่าความเรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

สำหรับในกรณีของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.004 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.044 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 นั่นคือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสามตัวแปรต่างส่งผลต่อค่าความเรียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05

#### 4.9 ความขาวสว่าง (brightness)

ตารางที่ 4-9 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความขาวสว่าง

ปริมาณไฟน์ (ร้อยละ)	ความขาวสว่าง (% ISO)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) ±SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) ±SD
0	80.251 ± 0.279	80.251 ± 0.279	34.492 ± 0.612	34.492 ± 0.612
5	80.150 ± 0.081	71.843 ± 0.183	35.303 ± 0.398	34.096 ± 0.166
7.79	-	-	35.440 ± 0.443	34.256 ± 0.148
8.78	80.187 ± 0.113	67.426 ± 0.164	-	-
10	80.168 ± 0.132	66.248 ± 0.127	36.806 ± 0.861	34.279 ± 0.101
20	80.057 ± 0.098	57.693 ± 0.282	38.048 ± 0.259	34.511 ± 0.128
30	79.826 ± 0.234	52.279 ± 0.509	40.305 ± 0.471	34.583 ± 0.069



ภาพที่ 4-9 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความขาวสว่าง

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-9 พบว่า แผ่นทดสอบที่เตรียมจากเยื่อไม่ฟอกและไฟน์ไม่ฟอกจะให้ค่าความขาวสว่างต่ำ แผ่นทดสอบที่เตรียมจากเยื่อฟอกและไฟน์ฟอกจะมีค่าความขาวสว่างสูง และเมื่อนำไฟน์ไม่ฟอกมาผสมกับเยื่อฟอกมีผลทำให้ค่าความขาวสว่าง

ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นเพราะเยื่อไม่ฟอกและไฟน์ไม่ฟอกยังมีลิกนินเหลืออยู่มาก การเพิ่มปริมาณไฟน์ไม่ฟอกลงผสมในเยื่อฟอก จึงมีผลทำให้ความขาวสว่างลดลง และการเพิ่มปริมาณไฟน์ฟอกลงผสมในเยื่อไม่ฟอกก็ส่งผลทำให้ความขาวสว่างเพิ่มขึ้นเช่นกัน

เมื่อนำค่าความขาวสว่างที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA:  $6 \times 2 \times 2$  factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ชนิดเยื่อ (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และชนิดไฟน์ (C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 จึงมีผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

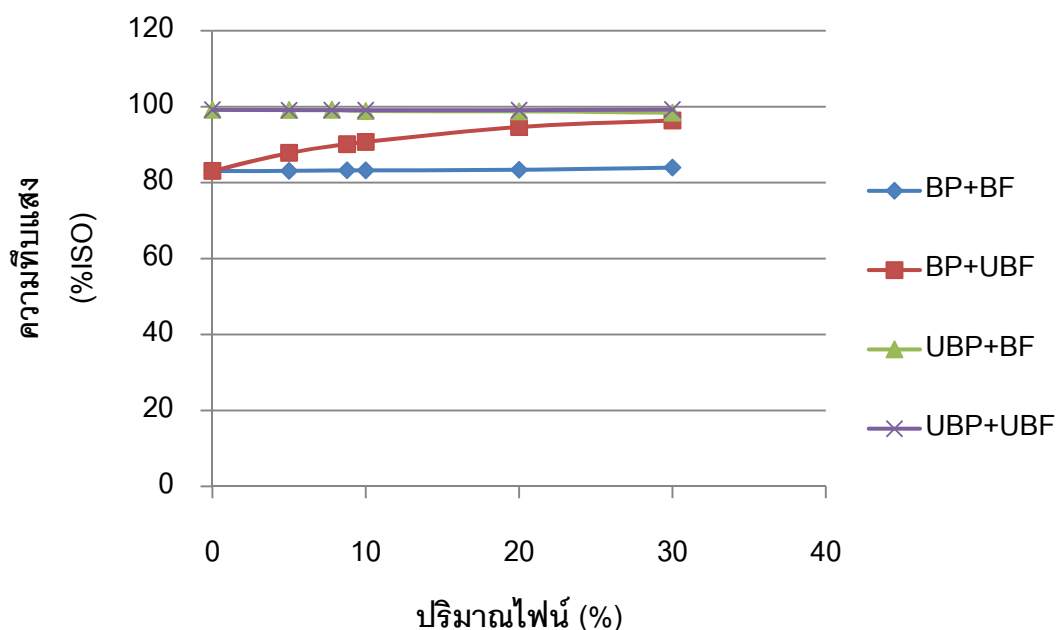
ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ต่างก็มีผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ทั้งหมด

#### 4.10 ความทึบแสง (opacity)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-10 และภาพที่ 4-10 พบว่า เยื่อไม่ฟอกให้ค่าความทึบแสงสูงกว่าเยื่อฟอก และการใส่ไฟน์ไม่ฟอกลงไปผสมกับเยื่อฟอกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความทึบแสงยิ่งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใส่ไฟน์ฟอกลงไปผสมกับเยื่อไม่ฟอกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้น มีผลทำให้ค่าความทึบแสงลดลงบ้างเมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าเยื่อไม่ฟอกและไฟน์ไม่ฟอกมีสีที่คล้ำกว่าเยื่อฟอกและไฟน์ฟอก เนื่องจากมีปริมาณลิกนินมากกว่า จึงทำให้มีการดูดกลืนแสงไว้มากกว่า ค่าความทึบแสงจึงมีค่าสูงกว่า การใส่ปริมาณไฟน์ไม่ฟอกลงไปผสมกับเยื่อฟอกจึงเห็นผลอย่างชัดเจนว่ามีผลทำให้ความทึบแสงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนการใส่ไฟน์ฟอกลงไปผสมกับเยื่อไม่ฟอก ทำให้ความทึบแสงลดลง เนื่องจากการลดลงของปริมาณลิกนินนั่นเอง ซึ่งในกรณีนี้แสดงว่าปริมาณลิกนินในเยื่อหรือไฟน์จะมีบทบาทต่อความทึบแสงมากกว่าปริมาณไฟน์ที่ใส่ไป

ตารางที่ 4-10 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความทึบแสง

ปริมาณไฟน์ (ร้อยละ)	ความทึบแสง (% ISO)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก
	(BP+BF) ±SD	(BP+UBF) ±SD	(UBP+BF) ±SD	(UBP+UBF) ±SD
0	83.066 ± 0.271	83.066 ± 0.271	99.173 ± 0.072	99.173 ± 0.072
5	83.072 ± 0.328	87.824 ± 0.415	99.141 ± 0.060	99.042 ± 0.089
7.79	-	-	99.177 ± 0.155	99.070 ± 0.067
8.78	83.228 ± 0.287	90.125 ± 0.268	-	-
10	83.200 ± 0.446	90.714 ± 0.328	98.841 ± 0.080	99.049 ± 0.214
20	83.363 ± 0.402	94.622 ± 0.103	98.749 ± 0.110	99.045 ± 0.169
30	83.942 ± 0.183	96.349 ± 0.207	98.407 ± 0.156	99.233 ± 0.098



ภาพที่ 4-10 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อความทึบแสง

เมื่อนำค่าความทึบแสงที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ชนิดเยื่อ (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และชนิดไฟน์ (C) มีค่า

P-value เท่ากับ 0.000 ต่างมีผลต่อค่าความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ต่างมีผลต่อค่าความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกัน

#### 4.11 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

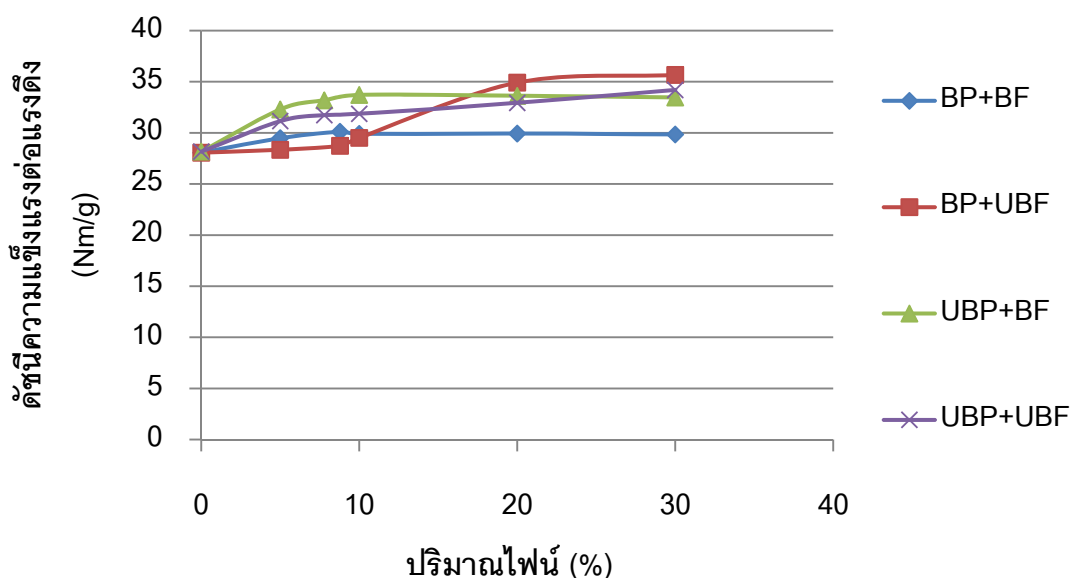
ตารางที่ 4-11 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

ปริมาณไฟน์ (ร้อยละ)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) $\pm$ SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) $\pm$ SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) $\pm$ SD
0	28.060 $\pm$ 1.267	28.060 $\pm$ 1.267	28.162 $\pm$ 1.297	28.162 $\pm$ 1.297
5	29.477 $\pm$ 1.052	28.346 $\pm$ 0.711	32.292 $\pm$ 0.686	31.149 $\pm$ 1.466
7.79	-	-	33.186 $\pm$ 0.764	31.731 $\pm$ 1.388
8.78	30.103 $\pm$ 0.512	28.732 $\pm$ 0.751	-	-
10	29.893 $\pm$ 0.857	29.509 $\pm$ 0.620	33.715 $\pm$ 1.052	31.853 $\pm$ 1.368
20	29.927 $\pm$ 0.586	34.915 $\pm$ 0.929	33.626 $\pm$ 1.413	32.929 $\pm$ 1.975
30	29.840 $\pm$ 1.065	35.673 $\pm$ 0.884	33.459 $\pm$ 0.716	34.196 $\pm$ 1.191

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-11 และภาพที่ 4-11 พบว่า การเพิ่มปริมาณไฟน์ให้สูงขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากไฟน์อาจเข้าไปเพิ่มพื้นที่ผิวในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย [10] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์จนถึงค่าประมาณร้อยละ 20 โดยไม่ว่าจะเป็นไฟน์ชนิดฟอกหรือไม่ฟอกก็ตาม ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงส่วนใหญ่กลับมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นกรณีเยื่อฟอกผสมกับไฟน์ไม่ฟอก การที่เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์จนถึงค่าประมาณร้อยละ 20 แล้ว ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงก็เนื่องจากปริมาณไฟน์มีมากเกินไป จึงอาจทำให้ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยในระบบลดลง เพราะค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษไม่ได้ขึ้นอยู่กับ



พันธะระหว่างเส้นใยเพียงอย่างเดียว ความแข็งแรงของเส้นใยซึ่งเกี่ยวข้องกับความยาวของเส้นใย ก็ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4-11 ผลของปริมาณไฟเบอร์ ชนิดไฟเบอร์ และชนิดเยื่อที่มีต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

ในส่วนของผลของชนิดเยื่อต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นกลับพบว่า เมื่อเริ่มมีการใส่ปริมาณไฟเบอร์ต่างๆ ลงไปผสมนั้น เยื่อฟอกมีแนวโน้มให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำกว่าเยื่อไม่ฟอก ทั้งๆ ที่ปริมาณลิกนินในเยื่อฟอกมีน้อยกว่าเยื่อไม่ฟอก จึงควรที่จะส่งผลให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาไปถึงความยาวของเส้นใยจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 และปริมาณไฟเบอร์ที่ตรวจวัดได้จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 จะเห็นได้ว่าเยื่อฟอกนั้นมีความยาวของเส้นใยน้อยกว่าเยื่อไม่ฟอก และมีปริมาณไฟเบอร์ที่ตรวจวัดได้มากกว่าเยื่อไม่ฟอก ด้วยปัจจัยนี้จึงอาจส่งผลให้เยื่อฟอกมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยกว่าเยื่อไม่ฟอก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการใส่ไฟเบอร์ในปริมาณต่างๆ ลงไป ถ้าพิจารณาถึงรูปร่างของเส้นใยซึ่งหมายถึงความโค้งงอและการหักงอของเส้นใย พบว่าในเยื่อไม่ฟอกมีค่าดัชนีความโค้งงอและค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยน้อยกว่าเยื่อฟอก จึงส่งผลให้ในเยื่อไม่ฟอกมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าในเยื่อฟอก [41] ดังนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนของชนิดของไฟเบอร์พบว่า ไฟเบอร์ไม่ฟอกส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อนำมาผสมกับเยื่อทั้งแบบเยื่อฟอกและเยื่อไม่ฟอก อาจเป็นเพราะไฟเบอร์ไม่ฟอกมาจากเยื่อที่ไม่ฟอก ซึ่งมีความโค้งงอของเส้นใยน้อยกว่าเยื่อฟอก เมื่อมาผสมกับเยื่อฟอกซึ่งมีความโค้งงอที่มากกว่า จึงช่วยดึงสมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงของเยื่อฟอกเพิ่มขึ้นมาชัดเจนกว่าการนำไฟเบอร์ไม่ฟอกผสมกับเยื่อไม่ฟอกด้วยตนเอง ในขณะที่ไฟเบอร์ฟอกนั้นมีบทบาท

ในการเพิ่มความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมากในกรณีที่น่าไปผสมกับเยื่อไม่ฟอกเท่านั้น โดยให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นมาก หากแต่เมื่อนำไฟน์ฟอกไปผสมกับเยื่อฟอกแล้วพบว่า ส่งผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นน้อยมาก

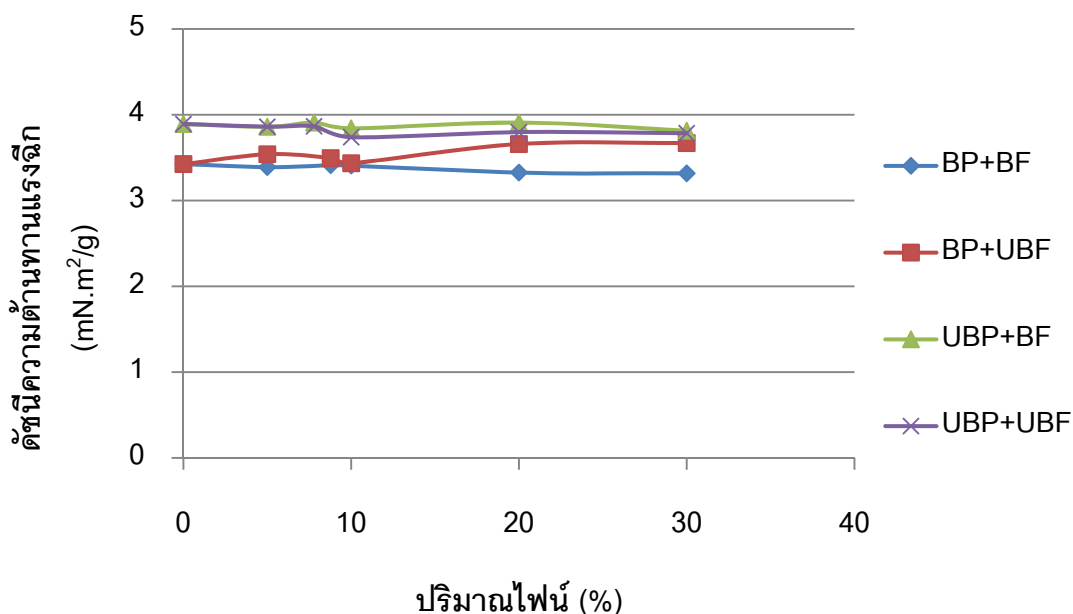
เมื่อนำค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้ ANOVA: 6 x 2 x 2 factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณไฟน์ (A) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ชนิดเยื่อ (B) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และชนิดไฟน์ (C) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ทุกๆปฏิสัมพันธ์ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกัน โดยปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์ (A\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไฟน์ (B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ (A\*B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000

#### 4.12 ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index)

ตารางที่ 4-12 ผลของปริมาณไฟน์ ชนิดไฟน์ และชนิดเยื่อที่มีต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก

ปริมาณไฟน์ (ร้อยละ)	ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (mN m <sup>2</sup> /g)			
	เยื่อฟอก+ไฟน์ฟอก (BP+BF) ±SD	เยื่อฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (BP+UBF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ฟอก (UBP+BF) ±SD	เยื่อไม่ฟอก+ไฟน์ไม่ฟอก (UBP+UBF) ±SD
0	3.426 ± 0.070	3.426 ± 0.070	3.893 ± 0.173	3.893 ± 0.173
5	3.390 ± 0.091	3.541 ± 0.058	3.860 ± 0.078	3.862 ± 0.205
7.79	-	-	3.908 ± 0.065	3.866 ± 0.253
8.78	3.412 ± 0.118	3.495 ± 0.096	-	-
10	3.409 ± 0.122	3.435 ± 0.136	3.842 ± 0.169	3.739 ± 0.221
20	3.326 ± 0.077	3.659 ± 0.068	3.909 ± 0.124	3.798 ± 0.231
30	3.317 ± 0.089	3.671 ± 0.048	3.815 ± 0.116	3.785 ± 0.136



ภาพที่ 4-12 ผลของปริมาณไฟเบอร์ ชนิดไฟเบอร์ และชนิดเยื่อที่มีต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-12 และภาพที่ 4-12 พบว่า แผ่นทดสอบที่เตรียมจากเยื่อไม่ฟอกมีค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าเยื่อฟอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในเยื่อไม่ฟอกมีการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ ซึ่งสารเคมีในการฟอกเยื่ออาจไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยในเยื่อไม่ฟอกลดลง ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกในเยื่อไม่ฟอกจึงลดลง นอกจากนี้ปริมาณลิกนินที่สูงกว่าของเยื่อไม่ฟอก อาจมีผลทำให้เส้นใยมีความแกร่งและแข็งแรง ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของเยื่อไม่ฟอกจึงมีค่าสูงกว่าเยื่อฟอก ถึงแม้ว่าเยื่อไม่ฟอกจะมีค่าดัชนีความโค้งงอและค่าดัชนีการหักงอที่มากกว่าเยื่อไม่ฟอก ซึ่งน่าจะส่งผลให้เยื่อไม่ฟอกมีค่าความต้านทานแรงฉีกที่สูงกว่าเยื่อไม่ฟอก แต่ผลไม่เป็นเช่นนั้น อาจเป็นเพราะอิทธิพลในส่วนของลิกนินที่อยู่ในเยื่อส่งผลมากกว่าอิทธิพลของลักษณะของเส้นใยก็เป็นได้

เมื่อเพิ่มปริมาณการใส่ไฟเบอร์ลงในเยื่อผสมโดยรวมแล้วพบว่า ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความยาวเฉลี่ยของเส้นใยในเยื่อผสมลดลง เพราะความต้านทานแรงฉีกจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเป็นหลัก ซึ่งถ้าเส้นใยยาวกว่าจะมีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าเส้นใยที่ขนาดสั้น อย่างไรก็ตามในกรณีของการใส่ไฟเบอร์ไม่ฟอกลงในเยื่อไม่ฟอกกลับส่งผลทำให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอิทธิพลของปริมาณลิกนินในไฟเบอร์ไม่ฟอกนั่นเอง

เมื่อนำค่าดัชนีความต้านทานแรงจิกที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้ ANOVA:  $6 \times 2 \times 2$  factorial โดยพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4-13 กลับพบว่า ปริมาณไพน์ (A) ซึ่งมีค่า P-value เท่ากับ 0.201 ไม่มีผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงจิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ส่วนชนิดเยื่อ (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และชนิดไพน์ (C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.001 จึงมีผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงจิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไพน์กับชนิดเยื่อ (A\*B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.111 จึงไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงจิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไพน์กับชนิดไพน์ (A\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.007 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อและชนิดไพน์ (B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และปฏิสัมพันธ์ของปริมาณไพน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไพน์ (A\*B\*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.001 จึงมีผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงจิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

**ตารางที่ 4-13** ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6x2x2 factorial ของปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ ชนิดไฟน์ และปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ

สมบัติต่างๆของเยื่อและกระดาษ	P - Value						
	A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C
ค่าสภาพระบายนํ้าของเยื่อ	0.000 *	0.000 *	0.007 *	0.001 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *
ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.000 *	0.000 *	0.004 *	0.003 *	0.120	0.173	0.372
ปริมาณไฟน์	0.000 *	0.001 *	0.000 *	0.014 *	0.000 *	0.000 *	0.007 *
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	0.000 *	0.000 *	0.075	0.000 *	0.004 *	0.350	0.001 *
ดัชนีการหักงอของเส้นใย	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.001 *	0.000 *
ความกว้างของเส้นใย	0.000 *	0.000 *	0.549	0.000 *	0.567	0.036 *	0.281
ความหนาแน่นปรากฏ	0.000 *	0.000 *	0.056	0.000 *	0.272	0.011 *	0.002 *
ความเรียบ	0.000 *	0.000 *	0.602	0.004 *	0.044 *	0.000 *	0.000 *
ความขาวสว่าง	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *
ความทึบแสง	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	0.201	0.000 *	0.001 *	0.111	0.007 *	0.000 *	0.001 *

**หมายเหตุ** A คือ ปริมาณไฟน์, B คือ ชนิดของเยื่อ, C คือ ชนิดของไฟน์, A\*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดเยื่อ, A\*C คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์กับชนิดไฟน์, B\*C คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเยื่อกับชนิดไฟน์ และ A\*B\*C คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์

\* คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-Value  $\leq$  0.05)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลของไฟน์ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อไซดาญุคาลิปตัล วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลและเปรียบเทียบผลของไฟน์จากเยื่อที่ผ่านการฟอกและไม่ผ่านการฟอกต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษ การศึกษามี 3 ตัวแปร คือ ปริมาณไฟน์ ชนิดเยื่อ และชนิดไฟน์ โดยใช้ไฟน์ทั้งชนิดฟอกและไม่ฟอกผสมกับเยื่อทั้งชนิดฟอกและไม่ฟอกในปริมาณต่างๆ จากนั้นนำเยื่อผสมไปขึ้นแผ่นทดสอบ และทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบ ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ปริมาณไฟน์มีผลต่อสภาพกระดาษได้มาก การเพิ่มปริมาณไฟน์ไม่ว่าจะเป็นไฟน์ฟอกหรือไฟน์ไม่ฟอกลงในเยื่อฟอกหรือเยื่อไม่ฟอก มีผลทำให้ค่าสภาพกระดาษได้ของเยื่อลดลง

5.1.2 ชนิดของเยื่อและปริมาณไฟน์มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยดังนี้คือ เยื่อฟอกจะมีค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยและค่าดัชนีความหักงอของเส้นใยมากกว่าเยื่อไม่ฟอก เยื่อไม่ฟอกมีความยาวของเส้นใยมากกว่าเยื่อฟอก เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์ ส่งผลให้ค่าความยาวของเส้นใย ค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใย ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใย และค่าความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง

5.1.3 อิทธิพลของการฟอกเยื่อมีผลต่อความขาวสว่างและความทึบแสงของแผ่นกระดาษ เยื่อฟอกให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อไม่ฟอกเยื่อ การเพิ่มไฟน์ไม่ฟอกในเยื่อฟอกจึงส่งผลให้ค่าความขาวสว่างลดลงอย่างชัดเจน เยื่อไม่ฟอกให้ค่าความทึบแสงของกระดาษสูงกว่าเยื่อฟอก ทั้งนี้เป็นเพราะสีของเยื่อ ส่งผลให้เยื่อไม่ฟอกมีการดูดกลืนแสงไว้มากกว่า ค่าความทึบแสงจึงสูงกว่า และการที่ใส่ไฟน์ไม่ฟอกลงไปผสมกับเยื่อฟอกมีผลทำให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะเยื่อผสมมีสีที่คล้ำมากขึ้น

5.1.4 ชนิดของเยื่อและไฟน์มีผลต่อความเรียบของกระดาษน้อยกว่าปริมาณของไฟน์ เพราะเมื่อใส่ไฟน์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นในเยื่อผสมส่งผลให้กระดาษมีความเรียบสูงขึ้น

5.1.5 ชนิดของเยื่อและไฟน์มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษน้อยกว่าปริมาณไฟน์ โดยความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์

5.1.6 กระดาษที่เตรียมจากเยื่อไม้ฟอกมีค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าเยื่อฟอก เมื่อเพิ่มปริมาณการใส่ไฟน์ลงในเยื่อผสมโดยรวมแล้วพบว่า ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกลดลง กรณีของการใส่ไฟน์ไม้ฟอกลงในเยื่อฟอกกลับส่งผลทำให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ปริมาณไฟน์ที่เพิ่มสูงขึ้นในเยื่อผสมส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไฟน์มากกว่าร้อยละ 20 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงส่วนใหญ่กลับมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นในกรณีของเยื่อผสมที่เตรียมจากเยื่อฟอกและไฟน์ไม้ฟอก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของไฟน์ต่อสมบัติของกระดาษที่เตรียมจากเยื่อไซดาเยุคาลิปตัส หากมีการศึกษาอิทธิพลของไฟน์จากเยื่อชนิดอื่นๆ และแบ่งขนาดของไฟน์ออกเป็นช่วงๆ ทั้งในเยื่อฟอกและไม้ฟอก หรือมีการนำไฟน์จากเยื่อชนิดหนึ่งมาผสมกับเยื่ออีกชนิดหนึ่ง ก็จะทำให้การศึกษาเรื่องอิทธิพลของไฟน์ต่อสมบัติของกระดาษมีความละเอียดของเนื้อหามากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไทยปี 2553 และแนวโน้มปี 2554 (อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ และสิ่งพิมพ์) [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: <http://www.ryt9.com/s/oie/1052309> [2554, มกราคม 5]
- [2] พัชรียา รัชฎา. อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อลักษณะเฉพาะของเยื่อจากทางใบปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- [3] Hiltunen, E. Papermaking Properties of Pulp in "Pulp and Paper Testing"-Papermaking Science and Technology Book 17. the Finnish Paper Engineers Association and TAPPI. Finland, 1999, pp. 38-63.
- [4] Mosbye, J. Colloidal Wood Resin: Analyses and Interactions. Ph.D. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, 2003, pp. 15-48.
- [5] Kangas, H., and Kleen, M. Surface Chemical and Morphological Properties of Mechanical Pulp Fines. Journal of Nordic Pulp and Paper Research 19(2): 1911-199 (February 2004).
- [6] องค์ประกอบของกระดาษ [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: <http://www.supremeprint.net/index.php?lay=show&ac=article&id=538770933> [2553, สิงหาคม 3]
- [7] นุชศรา นงนุช. ความเป็นไปได้ในการใช้เยื่อจากกระดาษคราฟต์และกระดาษกล่องมาผลิตกระดาษแข็งมือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, 2553.
- [8] องค์ประกอบของกระดาษ [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: [www.doublepaper.com/knowning/paper\\_element1.pdf](http://www.doublepaper.com/knowning/paper_element1.pdf) [2553, สิงหาคม 3]
- [9] Fourdriniermachine [online]. (n.d.). Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/file:fourdrinier.svg> [2011, January 9]
- [10] Casey, J.P. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. Vol.1. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.



- [11] วราพงษ์ ไสพิน. การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรรจากลำต้นข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2553.
- [12] Biermann, C.J. Essential of Pulping and Papermaking. San Diego: Academic Press, 1993.
- [13] การผลิตเยื่อกระดาษ [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา:  
[http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203\\_files/text/env/pulp-paper/thai/chap3.pdf](http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/thai/chap3.pdf) [2553, ธันวาคม 12]
- [14] วิชชา พิษัยณรงค์. การแยกกลินออกจากน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [15] Gullichsen, J. and Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology : Chemical Pulping Book 6A. Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000.
- [16] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper technologists. 2<sup>nd</sup> ed. Vancouver: Angus Wilde, 1994.
- [17] สุพิตา สุขจำเริญ. การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆของต้นข้าวโพดต่าง พันธุ์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [18] Casey, J.P. Bleaching of Chemical Pulps: Pulp and Paper-Chemical and Chemical Technology. Vol.1. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley-Interscience, 1980.
- [19] ชุมพล คุณวาสี. เอกสารประกอบการสอนวิชาความสัมพันธ์ระหว่างไม้กับน้ำ (wood-water relationships). ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [20] ณรงค์ โทณานนท์. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเรื่องไม้. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [21] Wood: cellular composition of wood [online]. (n.d.). Available from:  
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/647253/wood/216143/Primary-products>  
 [2011, January 25]
- [22] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. เอกสารวิชาการเรื่อง อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษในประเทศไทย ปี 2540. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540.

- [23] มนต์รี สนิทประชากร, สมศักดิ์ มนต์ศรีสุกใส และสัมฤทธิ์ กิตติธรรมกุล. การปลูกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กรมป่าไม้, 2529.
- [24] Eucalyptus pulp [online]. (n.d.). Available from: <http://www.paperonweb.com> [2011, December 20]
- [25] Pahkala, K. Agricultural and Food Science in Finland, Non-wood Plants as Raw Material for Pulp and Paper. Master Thesis. Faculty of Agriculture and Forestry. Finland: University of Helsinki, 2001.
- [26] Sjöström, E. and Alén, R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Berlin: Springer-verlag, 1999.
- [27] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [28] กาญจนา ชาญวรุฒิ. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อเลือกผ่าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [29] บุญยรัชต์ กิตติยานันท์ และรวินทร์ พลานันท์ทกุลธร. ซิลโฟเนชั่นของลิกโนเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- [30] Reme, P.A. Some Effects of Wood Characteristics and the Pulping Process on Mechanical Pulp Fibres. Ph.D. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology: Trondheim, 2000, p 57.
- [31] Ferreira, P.J., Martins, A.A., and Figueiredo, M.M. Primary and Secondary Fines from Eucalyptus Globules Kraft Pulps: Characterization and Influence. Paperi ja Puu. 82(6): 403-408 (2000).
- [32] Heijnesson, A., Simonson, R., and Westermark, U. Metal Ion Content of Material Removed from the Surface of Unbleached Kraft Fibres. Holzforchung. 49(1): 75-80 (1995).
- [33] Sundberg, A., Pranovich, A.V., and Holmbom, B. Chemical Characterization of Various Types of Mechanical Pulp Fines. Journal of Pulp and Paper Science. 29(5): 173-178 (2003).

- [34] Liimatainan, H. Interactions Between Fibres Fines and Fillers in Papermaking: Influence on Dewatering and Retention of Pulp Suspensions. Academic Dissertation. University of Oulu. Linnanmaa, 2009, pp. 23-55.
- [35] Ullman, U., Billing, O, and Jonsson, A. Fibre Classification as a Method of Characterizing Pulp. Pulp and Paper Canada. 69(17): 69-83(1968).
- [36] T 233 cm-95. Fiber Length of Pulp by Classification. Georgia: TAPPI Press, 1995.
- [37] Scan-CM 6:05. Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee: Fiber fractionation in the McNett classifier. SCAN Test Methods. Stockholm: (n.p.), 2005.
- [38] Gooding, R.W., Olson, J.A. Fractionation in a Bauer-McNett Classifier. Journal of Pulp and Paper Science. 27(12): 423-427 (December 2001).
- [39] ศยามล กองสุทธิผล. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติของเส้นใยจากเยื่อใยสั้น เยื่อใยยาว และเยื่อจากพืชที่ไม่ใช่ไม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [40] Hiltunen, E. On The Beating of Reinforcement Pulp. Finland : Helsinki University of Technology, 2003.
- [41] Mohlin, U.B., Dahlbom, J., Hornatowska, J. Fiber Deformation and Sheet Strength. Tappi Journal. 79(6): 105-111 (1996).
- [42] Seth, R.S. and Chan, B.K. Measuring Fiber Strength of Papermaking Pulps. Tappi Journal. 1999: 115-120.
- [43] Robertson, G., Olson, J., Chan, B., Seth, R. Measurement of Fiber Length, Coarseness and Shape with The Fiber Quality Analyzer. Tappi Journal. 1999: 93-98.
- [44] Sirvio, J., and Nurminen, I. Paper properties. Systematic Changes in Paper Properties Caused by Fines. Pulp and Paper Canada. 105(8): 39-42 (2004).
- [45] Patel, M., and Trivedi, R. Papermaking Fines. Variations in Strength and Bonding Properties of Fines from Filler, Fiber and Their Aggregates. Tappi Journal. 77(3): 185-192.

- [46] Lee, H., Nam, W.S., Sohn, S.D., Paik, K.H. Effect of Different Types of Fines on the Properties of Recycled Chemical Pulp. Journal of Industry and Engineering Chemistry. 17(2011): 100-104.
- [47] T 200 sp-01. Laboratory Beating of Pulp (Valley Beater Method). TAPPI Test Methods. Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [48] T 277 om-04. Freeness of Pulp (Canadian Standard Method). TAPPI Test Methods. Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [49] Beating or Refining [online]. (n.d.). Available from: <http://www.paperonweb.com> [2010, December 20]
- [50] ISO 16065-1. Pulps-Determination of Fiber Length by Automated Optical. International Organization for Standardization. Switzerland: (n.p.), 2001.
- [51] ISO 5269-2. Pulp Preparation of Laboratory Sheets for Physical Testing. International Organization for Standardization. Switzerland: (n.p.), 1998.
- [52] TAPPI. TAPPI Test Methods. Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [53] T 525 om-02. Diffuse brightness of pulp ( $d/0$ ). TAPPI Test Methods. Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [54] T 519 om-02. Diffuse Opacity of Paper ( $d/0^\circ$  Paper Backing). TAPPI Test Methods. Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [55] T 494 om-01. Tensile Properties of Paper and Paperboard (Using Constant Rate of Elongation Apparatus). TAPPI Test Methods. Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [56] T 414 om-98. Internal Tearing Resistance of Paper (Elmendorf-Type Method). TAPPI Test Methods. Georgia: TAPPI Press, 2002.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณ

#### 1. วิธีการคำนวณหาปริมาณความชื้นของเยื่อ

นำเยื่อที่จะใช้ในการทดลองมาทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบ หลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้น โดยคำนวณได้จาก

$$\text{ความชื้นของเยื่อ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อก่อนอบ} - \text{น้ำหนักเยื่อหลังอบ}}{\text{น้ำหนักเยื่อก่อนอบ}} \times 100$$

#### 2. การคำนวณหาน้ำหนักเยื่อสำหรับการัดขนาดเส้นใยด้วย Bauer-McNett classifier

เยื่อที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 48 และน้ำหนักของเยื่อแห่งที่นำมาใช้ในการัดขนาดเส้นใยด้วย Bauer- McNett classifier ต้องใช้ 10 กรัมของน้ำหนักแห่งจากมาตรฐาน T 233 cm-95

เยื่อมีน้ำหนักแห้ง 52 กรัม (100 - 48)

จากเยื่อทั้งหมด 100 กรัม

ต้องการน้ำหนักของเยื่อแห้ง 10 กรัม

ต้องนำเยื่อมา  $(100 \times 10)/52$  กรัม

= 19.23 กรัม

ดังนั้นต้องนำเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 48 มาจำนวน 19.23 กรัม ถึงจะได้เยื่อที่มีน้ำหนักแห้ง 10 กรัม เพื่อนำมาัดขนาดเส้นใยด้วย Bauer-McNett classifier

### 3. การคำนวณความเข้มข้นของน้ำหนักระเหย (consistency)

ความเข้มข้นของเยื่อ เป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักระเหยอบแห้งต่อน้ำหนักระเหยก่อนอบ ซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำหนักระเหยแห้งบวกน้ำหนักรีดน้ำ โดยคำนวณจาก

$$\text{ความเข้มข้นของเยื่อ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักระเหยแห้ง}}{\text{น้ำหนักระเหยแห้ง} + \text{น้ำหนักรีดน้ำ}} \times 100$$

### 4. วิธีการคำนวณเยื่อในการบดเยื่อ

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 กำหนดให้ใช้น้ำหนักระเหยแห้งในการบดเยื่อ 360 กรัม น้ำหนักแห้ง ในน้ำปริมาตร 23 ลิตร ซึ่งจะมีค่าความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) เท่ากับร้อยละ 1.56 เยื่อมีความชื้นร้อยละ 48 ดังนั้นถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัมคำนวณได้ดังนี้

เยื่อมีน้ำหนักระเหยแห้ง 52 กรัม (100 - 48)	จากเยื่อทั้งหมด 100 กรัม
ต้องการน้ำหนักระเหยแห้ง 360 กรัม	ต้องนำเยื่อมา $(100 \times 360)/52$ กรัม
	= 692.31 กรัม

ดังนั้นต้องนำเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 48 มา 692.31 กรัมถึงจะได้เยื่อแห้ง 360 กรัม น้ำหนักระเหยแห้ง และพบว่ามีย่าน้ำอยู่ในเยื่อแล้ว  $692.31 - 360 = 332.31$  กรัม ดังนั้นจะต้องเติมน้ำเพิ่มลงไปอีก 22667.69 กรัม เพื่อที่จะทำให้น้ำเยื่อก่อนการบดมีความเข้มข้นร้อยละ 1.56

### 5. วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1,000 มิลลิลิตร ในการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ และในการหาจะตวงน้ำเยื่อมาจากเครื่องบดเยื่อซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 1.56 ดังนั้นจะใช้สูตรดังต่อไปนี้ ในการตวงปริมาตรน้ำเยื่อจากเครื่องบดเยื่อเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

เมื่อ  $C_1$  = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

$C_2$  = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดคือ ร้อยละ 1.56

$V_1$  = ปริมาณน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อคือ 1,000 มิลลิลิตร

$V_2$  = ปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ

$$0.3 \times 1000 = 1.56 \times V_2$$

$$V_2 = (0.3 \times 1000) / 1.56$$

$$V_2 = 192 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.56 มา 192 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร แล้วนำไปหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

## 6. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20.02 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 ตารางเมตร ถ้าจะทำการขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งดังนี้

แผ่นทดสอบ 1 ตารางเมตร

ใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 60 กรัม

ถ้าแผ่นทดสอบ 0.0315 ตารางเมตร

ใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น  $60 \times 0.0315$  กรัม

= 1.89 กรัม

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 1.89 กรัมในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นทดสอบ 1 แผ่น มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร



ในแต่ละสภาวะจะขึ้นแผ่นทดสอบสภาวะละ 10 แผ่น ดังนั้นจะใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นทั้งหมดเท่ากับ  $1.89 \times 10 = 18.9$  กรัม

ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในการขึ้นแผ่นเท่ากับร้อยละ 0.3

จาก

$$\text{ความเข้มข้นของเยื่อ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100$$

$$\frac{0.3}{100} = \frac{18.9}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}}$$

$$\text{น้ำหนักน้ำ} = 6,300 - 18.9 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักน้ำ} = 6,281.1 \text{ กรัม}$$

เติมน้ำ 6,281.1 กรัม ในเยื่อแห้ง 18.9 กรัม จะได้ความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 0.3 เยื่อมีความชื้นอยู่ต้องหากลบน้ำที่อยู่ในเยื่อก่อนเติมน้ำด้วย

เมื่อได้เยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 แล้ว ต้องทำการตวงน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้มีน้ำหนักเยื่อ 1.89 กรัม เทียบดังนี้

เยื่อ 0.3 กรัม	ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร
ต้องการเยื่อ 1.89 กรัม	ต้องตวงน้ำเยื่อมา $(1.89 \times 100) / 0.3$
	= 630 มิลลิลิตร

ดังนั้นตวงน้ำเยื่อจำนวน 630 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่นก็จะได้น้ำหนักแผ่นทดสอบที่มีขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร

## ภาคผนวก ข

## ตารางข้อมูลผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าสภาวะบាយ  
ได้ของเยื่อ (Freeness) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

## Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Freeness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	77280.159 <sup>a</sup>	19	4067.377	60.149	.000
Intercept	2.797E7	1	2.797E7	413679.919	.000
Content	56024.394	4	14006.098	207.124	.000
Pulp	5839.653	1	5839.653	86.357	.000
Fines	533.028	1	533.028	7.882	.007
Content * Pulp	1401.894	4	350.473	5.183	.001
Content * Fines	5132.394	4	1283.098	18.975	.000
Pulp * Fines	4735.503	1	4735.503	70.029	.000
Content * Pulp * Fines	3613.294	4	903.323	13.358	.000
Error	4057.313	60	67.622		
Total	2.806E7	80			
Corrected Total	81337.472	79			

a. R Squared = .950 (Adjusted R Squared = .934)

ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าความยาวเส้นใยแบบ LWW เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Fiber length (LWW)

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.136 <sup>a</sup>	19	.007	7.221	.000
Intercept	42.041	1	42.041	42532.193	.000
Content	.082	4	.020	20.723	.000
Pulp	.013	1	.013	13.625	.000
Fines	.009	1	.009	8.754	.004
Content * Pulp	.018	4	.004	4.511	.003
Content * Fines	.008	4	.002	1.913	.120
Pulp * Fines	.002	1	.002	1.904	.173
Content * Pulp * Fines	.004	4	.001	1.085	.372
Error	.059	60	.001		
Total	42.236	80			
Corrected Total	.195	79			

a. R Squared = .696 (Adjusted R Squared = .599)

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าปริมาณไฟน์ (Fine content) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Fine content

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2437.933 <sup>a</sup>	19	128.312	191.963	.000
Intercept	6995.801	1	6995.801	10466.153	.000
Content	2278.465	4	569.616	852.181	.000
Pulp	8.725	1	8.725	13.052	.001
Fines	88.947	1	88.947	133.070	.000
Content * Pulp	9.187	4	2.297	3.436	.014
Content * Fines	32.723	4	8.181	12.239	.000
Pulp * Fines	9.403	1	9.403	14.067	.000
Content * Pulp * Fines	10.484	4	2.621	3.921	.007
Error	40.105	60	.668		
Total	9473.839	80			
Corrected Total	2478.038	79			

a. R Squared = .984 (Adjusted R Squared = .979)

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (Curl Index) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Curl Index

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.004 <sup>a</sup>	19	.000	9.651	.000
Intercept	.572	1	.572	26669.941	.000
Content	.002	4	.001	23.329	.000
Pulp	.000	1	.000	19.504	.000
Fines	7.031E-5	1	7.031E-5	3.276	.075
Content * Pulp	.001	4	.000	6.996	.000
Content * Fines	.000	4	9.422E-5	4.390	.004
Pulp * Fines	1.901E-5	1	1.901E-5	.886	.350
Content * Pulp * Fines	.000	4	.000	5.212	.001
Error	.001	60	2.146E-5		
Total	.578	80			
Corrected Total	.005	79			

a. R Squared = .753 (Adjusted R Squared = .675)

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าดัชนีความหักงอของเส้นใย (Kink index) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Kink index

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2.027 <sup>a</sup>	19	.107	44.321	.000
Intercept	219.629	1	219.629	91254.206	.000
Content	.578	4	.144	60.007	.000
Pulp	.610	1	.610	253.255	.000
Fines	.121	1	.121	50.137	.000
Content * Pulp	.171	4	.043	17.781	.000
Content * Fines	.344	4	.086	35.708	.000
Pulp * Fines	.029	1	.029	11.889	.001
Content * Pulp * Fines	.175	4	.044	18.208	.000
Error	.144	60	.002		
Total	221.800	80			
Corrected Total	2.171	79			

a. R Squared = .933 (Adjusted R Squared = .912)

ตารางที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าความกว้างของเส้นใย (Fiber width) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Fiber Width

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	13.193 <sup>a</sup>	19	.694	6.214	.000
Intercept	24206.882	1	24206.882	216616.394	.000
Content	4.865	4	1.216	10.885	.000
Pulp	2.665	1	2.665	23.843	.000
Fines	.040	1	.040	.362	.549
Content * Pulp	4.198	4	1.049	9.391	.000
Content * Fines	.332	4	.083	.743	.567
Pulp * Fines	.512	1	.512	4.582	.036
Content * Pulp * Fines	.581	4	.145	1.299	.281
Error	6.705	60	.112		
Total	24226.780	80			
Corrected Total	19.898	79			

a. R Squared = .663 (Adjusted R Squared = .556)

ตารางที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Apparent density

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.031 <sup>a</sup>	19	.002	13.092	.000
Intercept	72.474	1	72.474	578359.419	.000
Content	.011	4	.003	21.742	.000
Pulp	.008	1	.008	63.750	.000
Fines	.000	1	.000	3.688	.056
Content * Pulp	.008	4	.002	16.315	.000
Content * Fines	.001	4	.000	1.300	.272
Pulp * Fines	.001	1	.001	6.577	.011
Content * Pulp * Fines	.002	4	.001	4.326	.002
Error	.023	180	.000		
Total	72.527	200			
Corrected Total	.054	199			

a. R Squared = .580 (Adjusted R Squared = .536)



ตารางที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าความเรียบ (Smoothness) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Smoothness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	427.991 <sup>a</sup>	19	22.526	66.708	.000
Intercept	24379.632	1	24379.632	72197.786	.000
Content	306.389	4	76.597	226.835	.000
Pulp	55.831	1	55.831	165.337	.000
Fines	.092	1	.092	.273	.602
Content * Pulp	5.388	4	1.347	3.989	.004
Content * Fines	3.378	4	.844	2.501	.044
Pulp * Fines	19.864	1	19.864	58.825	.000
Content * Pulp * Fines	37.050	4	9.262	27.430	.000
Error	60.782	180	.338		
Total	24868.405	200			
Corrected Total	488.773	199			

a. R Squared = .876 (Adjusted R Squared = .863)

ตารางที่ ข-9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าความขาวสว่าง (Brightness) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Brightness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	79662.836 <sup>a</sup>	19	4192.781	31933.183	.000
Intercept	589406.988	1	589406.988	4489059.194	.000
Content	800.922	4	200.230	1525.001	.000
Pulp	69135.468	1	69135.468	526551.623	.000
Fines	3623.388	1	3623.388	27596.558	.000
Content * Pulp	1852.548	4	463.137	3527.358	.000
Content * Fines	1723.039	4	430.760	3280.765	.000
Pulp * Fines	1749.006	1	1749.006	13320.835	.000
Content * Pulp * Fines	778.466	4	194.616	1482.243	.000
Error	23.634	180	.131		
Total	669093.458	200			
Corrected Total	79686.470	199			

a. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = 1.000)

ตารางที่ ข-10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าความทึบแสง (Opacity) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Opacity

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9715.231 <sup>a</sup>	19	511.328	9051.004	.000
Intercept	1728161.728	1	1728161.728	3.059E7	.000
Content	286.448	4	71.612	1267.603	.000
Pulp	7276.160	1	7276.160	128795.150	.000
Fines	690.619	1	690.619	12224.624	.000
Content * Pulp	349.980	4	87.495	1548.746	.000
Content * Fines	284.165	4	71.041	1257.498	.000
Pulp * Fines	601.941	1	601.941	10654.942	.000
Content * Pulp * Fines	225.918	4	56.480	999.744	.000
Error	10.169	180	.056		
Total	1737887.128	200			
Corrected Total	9725.400	199			

a. R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .999)

ตารางที่ ข-11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Tensile index

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1220.148 <sup>a</sup>	19	64.218	49.680	.000
Intercept	194215.420	1	194215.420	150246.103	.000
Content	696.600	4	174.150	134.723	.000
Pulp	125.535	1	125.535	97.115	.000
Fines	20.099	1	20.099	15.549	.000
Content * Pulp	67.383	4	16.846	13.032	.000
Content * Fines	159.347	4	39.837	30.818	.000
Pulp * Fines	75.301	1	75.301	58.253	.000
Content * Pulp * Fines	75.883	4	18.971	14.676	.000
Error	232.677	180	1.293		
Total	195668.245	200			
Corrected Total	1452.825	199			

a. R Squared = .840 (Adjusted R Squared = .823)

ตารางที่ ข-12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) แบบ 6 x 2 x 2 factorial ของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่างๆ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Tear index

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	8.869 <sup>a</sup>	19	.467	25.766	.000
Intercept	2663.967	1	2663.967	147038.534	.000
Content	.110	4	.027	1.511	.201
Pulp	7.206	1	7.206	397.735	.000
Fines	.193	1	.193	10.626	.001
Content * Pulp	.138	4	.035	1.906	.111
Content * Fines	.264	4	.066	3.649	.007
Pulp * Fines	.612	1	.612	33.777	.000
Content * Pulp * Fines	.347	4	.087	4.786	.001
Error	3.261	180	.018		
Total	2676.098	200			
Corrected Total	12.130	199			

a. R Squared = .731 (Adjusted R Squared = .703)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

### ประวัติส่วนตัว

นางสาวแพรวพรรณศิริ มีพงษ์

เกิดเมื่อวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกาญจนบุรี

### ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนดรุณากาญจนบุรี
- ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

### ผลงานวิชาการ

- Meepong, P., Suvarnakich, K. and Chaiarekij, S. (2011). Effects of Fines on Paper Properties from Eucalyptus Pulp. The 1<sup>st</sup> National / International Silpakorn Graduate Study Conference 2011. 10–11 May 2011. Bangkok, Thailand. pp. 1242-1246.