ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ ฟว
อว 5

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน

เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว

ของ

นายจิระศักดิ์ ชัยสนิท

เรื่องที่ 1

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อกระดาษที่ผลิตด้วยกระบวนการแบบโมโนซัลไฟท์ จากฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่

โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

2545

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน

เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว

ของ

นายจิระศักดิ์ ชัยสนิท

เรื่องที่ 1

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อกระดาษที่ผลิตด้วยกระบวนการแบบโมโนซัลไฟท์ จากฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่

เลขหมู่ ๑๗ ฟว
๑๐๓ ๕
เลขทะเบียน ๑๓๙๑๒
วันที่ ๒๕ ๒-๕๑ ๔๙

โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

2545

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บทคัดย่อ

รายงานนี้ เสนอผลการศึกษาวิจัยการผลิตเยื่อจากฟางข้าวเก่าของบริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่า มีปริมาณของโฮโลเซลลูโลส แอลฟ่าเซลลูโลส เบต้าเซลลูโลส และแกมม่าเซลลูโลส ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวใหม่ ปริมาณเถ้าและการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการนำฟางข้าวเก่าไปใช้ผลิตเยื่อกระดาษจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงและผลผลิตเยื่อกระดาษต่ำ ในส่วนของผลผลิตเยื่อจากฟางข้าวเก่าด้วยกระบวนการแบบโมโนซัลไฟท์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตเยื่อจากโรงงานซึ่งโดยปกติจะใช้ฟางข้าวใหม่เป็นวัสดุในการผลิตเยื่อกระดาษ (ใช้กระบวนการแบบโมโนซัลไฟท์) จะให้ผลผลิตเยื่อเท่ากับร้อยละ 34.7 และ 47.5 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 26.9 ซึ่งในการผลิตเยื่อฟางข้าวเก่าไม่ฟอกในห้องปฏิบัติการจำนวน 1 ตัน จะต้องใช้โซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อฟางข้าวใหม่ไม่ฟอกเท่ากับ 70 และ 23.3 กิโลกรัมตามลำดับ สำหรับการวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใยของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางฟางข้าวใหม่ (เตรียมเยื่อในห้องปฏิบัติการ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเยื่อฟางข้าวเก่ามีส่วนละเอียดปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก เส้นใยและ vessel element มีลักษณะถูกทำลายภายหลังจากผ่านการต้มเยื่อ ส่วนในเยื่อฟางข้าวใหม่ เส้นใยและ vessel element มีลักษณะที่สมบูรณ์กว่า

ผลจากการศึกษาวิจัยนี้สรุปได้ว่า ฟางข้าวเก่าของบริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ไม่มีความเหมาะสมในการที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษที่มีคุณภาพด้านความเหนียวตามจุดประสงค์ของการผลิตเยื่อ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
สารบัญตาราง	ก
สารบัญภาพ	ข
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระดาษ	3
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้	4
2.3 องค์ประกอบของกระดาษ	6
2.4 แหล่งเส้นใย	7
2.5 กระบวนการผลิตเยื่อ	8
2.6 2.6 อิทธิพลของการบดเยื่อ	10
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการ	13
3.1 วัสดุ	13
3.2 อุปกรณ์	13
3.3 สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม	14
3.4 วิธีดำเนินการ	15
3.4.1 ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่	15
3.4.2 ศึกษาผลการผลิตเยื่อเคมีแบบซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่า	15
3.4.3 การวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใยของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าและเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่	17
แผนผังแสดงวิธีดำเนินการ	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลอง 19

4.1 ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่ 19

4.2 ศึกษาผลการผลิตเยื่อเคมีแบบซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่า 20

4.3 การวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใยของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าและเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ 21

บทที่ 5 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง 22

คำขอบคุณ 28

เอกสารอ้างอิง 29

ภาคผนวก ก. คำร้องบริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด 30

ภาคผนวก ข. วิธีวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี 32

ภาคผนวก ค. คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ – ทดสอบ 33

ภาคผนวก ง. ภาพเส้นใย (fiber), vessel element, parenchyma และ leaf epidermis ของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่ 36

ภาพแสดงกราฟ ปริมาณเถ้า การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ปริมาณแอลฟ่าเซลลูโลส ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก 43

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่	19
2	แสดงสมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ	20
3	แสดงผลการวัดขนาดของเส้นใย	21
4	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้	23
5	เปรียบเทียบค่าฟรีเนสของเยื่อและเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียกของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่	25

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงเส้นใยจากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 10x)	36
2	แสดงเส้นใยจากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)	36
3	แสดง vessel element จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)	37
4	แสดง vessel element จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 50x)	37
5	แสดง parenchyma จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)	38
6	แสดง parenchyma จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 50x)	38
7	แสดง leaf epidermis จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)	39
8	แสดงเส้นใยจากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 10x)	39
9	แสดงเส้นใย และ parenchyma จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 10x)	40
10	แสดงเส้นใย และ parenchyma จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 20x)	40
11	แสดง vessel element จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 50x)	41
12	แสดง parenchyma จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 50x)	41
13	แสดง leaf epidermis จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 10x)	42
14	แสดง leaf epidermis จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 20x)	42
15	แสดงกราฟ ปริมาณเถ้าของฟางข้าวเก่า ฟางข้าวใหม่ และไม้ชนิดอื่นๆ	43
16	แสดงกราฟ การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ของฟางข้าวเก่า ฟางข้าวใหม่ และไม้ชนิดอื่นๆ	43
17	แสดงกราฟ ปริมาณแอลฟ่าเซลลูโลส ของฟางข้าวเก่า ฟางข้าวใหม่ และไม้ชนิดอื่นๆ	44
18	แสดงกราฟ ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า เยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ และเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ	44
19	แสดงกราฟ เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก ของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า เยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ และเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ	45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย

ในอดีตเยื่อฟางข้าวนับเป็นวัสดุที่สำคัญสำหรับผลิตเยื่อกระดาษภายในประเทศ มาเป็นเวลานานไม่ว่าจะเป็นการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการโซดา หรือใช้กระบวนการซัลไฟท์ เยื่อที่ได้สามารถนำมาผลิตเป็นกระดาษต่างๆ ได้ เช่น กระดาษพิมพ์และกระดาษเขียน เป็นต้น บริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ตั้งอยู่เลขที่ 48 หมู่ 7 ตำบลบางกะสั้น อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เริ่มก่อสร้างโรงงานเมื่อปี พ.ศ.2500 ได้ดำเนินการผลิตกระดาษออกจำหน่ายในปี พ.ศ.2505 เป็นโรงงานแห่งแรกและเป็นเพียงโรงงานเดียวของประเทศไทยที่ใช้ฟางข้าว ซึ่งจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agriculture residue) มาผลิตเยื่อและกระดาษ (เป็นเยื่อกระดาษจากเส้นใยประเภท non-wood) ตั้งแต่อดีตเป็นต้นมาจวบจนถึงปัจจุบัน (บริษัทฯ โอนมาเป็นรัฐวิสาหกิจ สังกัดกระทรวงอุตสาหกรรม เมื่อปี พ.ศ.2511) อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษฟอกขาวจากฟางข้าว มีน้ำทิ้งเกิดขึ้นในปริมาณมาก ซึ่งต้องนำไปผ่านขั้นตอนการบำบัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลองเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อชุมชน ที่มีการขยายตัวรอบโรงงานมากขึ้น ดังนั้นทางบริษัทฯ จึงมีค่าใช้จ่ายตามสถาณะการณ์ที่มีการรณรงค์ด้านสิ่งแวดล้อม และจากการที่ต้นทุนการผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นอันมีสาเหตุมาจากค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งที่เพิ่มขึ้น การรวบรวมวัสดุจากแหล่งต่างๆ ประกอบกับการที่มีโรงงานผลิตเยื่อภายในประเทศหลายโรงเกิดขึ้น และโรงงานต่างๆ เหล่านี้ได้ใช้วัสดุชนิดอื่นๆ เช่น ไม้ยูคาลิปตัส (เป็นเส้นใยประเภท hard-wood) ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ ทำให้ราคาเยื่อที่ผลิตได้ภายในประเทศมีราคาลดลง และเป็นที่ทราบกันดีว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อฟางข้าวมีคุณภาพด้านความเหนียวและความขาวสว่างต่ำกว่าเยื่อที่ผลิตได้จากไม้ยูคาลิปตัส รวมทั้งจากการนำเข้าเยื่อที่ผลิตได้จากไม้สน (เป็นเส้นใยประเภท soft-wood) โดยนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีคุณภาพดีกว่าเยื่อกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศ เช่น เยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัส ชานอ้อยและฟางข้าว เป็นต้น ทำให้การผลิตเยื่อกระดาษจากฟางข้าวมีความสำคัญลดลง จนปัจจุบันทางบริษัทฯ ได้หยุดทำการผลิตเยื่อกระดาษจากฟางข้าวแล้วจากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น

จากการที่เครื่องจักรในกระบวนการผลิตเกิดการชำรุด/สึกหรอ ทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนสูงเนื่องจากต้องทำการซ่อมบำรุง/ซ่อมแซม และทางบริษัทได้ทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษด้วยทำให้ต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งในการดำเนินการดังกล่าว ทำให้วัสดุฟางข้าวของบริษัทฯ ที่จัดเก็บเอาไว้เป็นเวลานานประมาณ 4 ปี มาแล้ว ภายหลังที่มีการหยุดเดินเครื่องจักรในกระบวนการผลิตเยื่อฟางข้าวฟอกขาว ทำให้ยังคงมีฟางข้าวเหลืออีกเป็นจำนวนมาก ดังนั้นทางบริษัทฯ มีความประสงค์ที่ต้องการศึกษาฟางข้าวที่เหลือดังกล่าวว่ายังคงมีสภาพที่จะสามารถนำมาผลิตเยื่อกระดาษได้หรือไม่ เพื่อทาง

โรงงานจะได้ดำเนินการอย่างหนึ่งอย่างใดต่อไป อันจะก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและสามารถจัดการกับฟางข้าวเหล่านี้ได้ ดังนั้นทางโรงงาน จึงได้ขอความร่วมมือจาก โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม [(กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัย (เดิม)] กรมวิทยาศาสตร์บริการ ให้ทำการศึกษาวิจัยในการนำตัวอย่างฟางข้าวนี้มาใช้เป็นวัสดุในการผลิตเยื่อ เพื่อทำการศึกษาว่ายังคงมีสภาพในการใช้เป็นวัสดุในการผลิตเยื่อได้อีกหรือไม่โดยใช้กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบโมโนซัลไฟท์ (monosulphite process) ซึ่งทางบริษัทฯ ได้ส่งตัวอย่างฟางข้าวใส่ในถุงพลาสติกปิดผนึกเรียบร้อย จำนวน 2 ถุง มีน้ำหนักประมาณ 10 กิโลกรัม และมีความชื้นประมาณร้อยละ 29 ซึ่งต่อไปนี้ในรายงานการศึกษาวิจัยนี้จะขอเรียกสั้นๆ ว่า "ฟางข้าวเก่า" และเรียกเยื่อกระดาษที่ได้จากการผ่านกระบวนการผลิตเยื่อว่า "เยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า"

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการผลิตเยื่อกระดาษ ด้วยกระบวนการแบบซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่าของบริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ว่ามีสภาพที่จะสามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็นเยื่อกระดาษได้หรือไม่

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

เพื่อให้การศึกษาวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ จึงได้วางแผนเพื่อกำหนดขอบเขตการดำเนินงานดังนี้

1.3.1 ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่

1.3.2 ศึกษาผลการผลิตเยื่อเคมีซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่า

1.3.3 การวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใย (fiber dimension measurement) ของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าและเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่

1.4 ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย *สิงหาคม 2544 - กันยายน 2545*

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 บริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ซึ่งเป็นผู้นำส่งตัวอย่างฟางข้าวเก่าสามารถนำผลการทดลองไปใช้ในเป็นข้อมูล ในการพิจารณาที่จะไม่ใช้ฟางข้าวเก่านี้ในการผลิตเป็นเยื่อกระดาษ

1.4.2 เจ้าหน้าที่ของกลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม [กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัย (เดิม)] ได้ประสบการณ์เพิ่มขึ้นในการผลิตเยื่อเคมีซัลไฟท์

บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระดาษ

ประวัติและวิวัฒนาการของกระดาษ

เมื่อประมาณ 2400 ปีก่อนคริสตกาล ชาวอียิปต์โบราณได้ค้นพบวิธีการบันทึกเรื่องราวต่าง ๆ บนแผ่นวัสดุซึ่งทำจากพืชชนิดหนึ่งที่เรียกว่า Papyrus โดยจะนำส่วนลำต้นของปาปิรุสมาฝานเป็นชิ้นบางๆ ตามความยาวของลำต้นแล้วนำมาเรียงซ้อนในลักษณะขวางกัน หลังจากนั้นนำไปทุบให้เป็นแผ่นบางแล้วเคลือบผิวด้วยกาว ดังนั้นคำว่า "paper" หรือ "กระดาษ" ที่เราพูดกันในปัจจุบันน่าจะมาจากคำว่า "papyrus" ของชาวอียิปต์โบราณ แต่อย่างไรก็ตามคำว่า papyrus ไม่ได้มีความหมายเดียวกันกับคำว่า paper ซึ่งเราใช้กันในปัจจุบัน เพราะเส้นใยของปาปิรุสไม่ได้แยกตัวออกจากกันตามความหมายของการผลิตกระดาษแบบสมัยใหม่

ในปี ค.ศ. 105 ชาวจีนชื่อ Ts'ai Lun เป็นคนแรกที่พบการทำกระดาษจากต้นไม้ โดยนำส่วนเปลือกของต้น mulberry มาทำเป็นชิ้นเล็กๆ ผสมกับเศษผ้าแล้วนำไปบดหรือตีในน้ำจนกระจายตัวเป็นเส้นใยแล้วนำตะแกรงซึ่งทำจากไม้ไผ่ช้อนเส้นใยที่แขวนลอยในน้ำนำไปตากให้แห้ง ซึ่งนับได้ว่าเป็นการผลิตกระดาษแผ่นแรกที่ทำจากไม้ หลังจากการค้นพบวิธีการผลิตกระดาษจากไม้ของ Ts'ai แล้ว ไม่เคยมีการผลิตกระดาษจากไม้อีกเลยนานนับเกือบ 2000 ปี จึงเริ่มมีการใช้ไม้เป็นวัสดุในการผลิตกระดาษอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวนิยมใช้เศษผ้าและแผ่นหนังเป็นวัสดุในการทำแผ่นบันทึกต่าง ๆ

ในสมัยโบราณความต้องการใช้กระดาษเพื่อการบันทึกขีดเขียนต่างๆ ยังมีน้อยมาก เพราะคนที่สามารถ อ่านออกเขียนได้มีจำนวนน้อย แต่หลังจากปี ค.ศ. 1450 เหตุการณ์ได้เปลี่ยนไปเมื่อชาวเยอรมันชื่อ Johann Gutenberg ได้ประดิษฐ์เครื่องพิมพ์แบบ Movable ได้สำเร็จทำให้การจัดพิมพ์ทำได้ง่ายและรวดเร็ว ดังนั้นความต้องการกระดาษเพื่อใช้ในการพิมพ์มีปริมาณสูงขึ้น และประกอบกับการใช้แผ่นวัสดุพิมพ์ที่ได้จากเศษผ้าและแผ่นหนังเริ่มหายากและไม่เพียงพอต่อความต้องการของการพิมพ์ จึงนับได้ว่าเป็นจุดสำคัญในการเริ่มต้นการผลิตกระดาษที่ทำจากไม้อีกครั้งหนึ่ง ในปลายศตวรรษที่ 18 การผลิตกระดาษด้วยมือไม่สามารถสนองตอบต่อความต้องการใช้กระดาษได้อย่างเพียงพออีกต่อไป ในปี ค.ศ. 1789 ชาวฝรั่งเศสชื่อ Nicolas Loius Robert ได้ประดิษฐ์เครื่องจักรผลิตกระดาษที่มีความยาวต่อเนื่องได้สำเร็จ เครื่องจักรที่ผลิตกระดาษของ Robert มีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับวิธีการผลิตกระดาษด้วยมือ (hand-dipping method) แต่เป็นที่น่าเสียดายที่ Robert ไม่ได้รับการสนับสนุนทางการเงิน จึงต้องขายลิขสิทธิ์ให้กับพี่น้องตระกูล Fourdrinier ซึ่งเป็นชาวลอนดอน และได้ปรับปรุงพัฒนาเครื่องจักรให้ดีขึ้นกว่าเดิมและให้ชื่อเครื่องจักรที่ผลิตกระดาษนี้ว่า Fourdrinier ซึ่งใช้ในการผลิตกระดาษมาจนตราบเท่าทุกวันนี้ความต้องการใช้กระดาษมีปริมาณสูงขึ้นอย่าง

ต่อเนื่อง การใช้เส้นใยจากเศษผ้ามีปริมาณลดลงมีการใช้เส้นใยจากไม้เพื่อทำกระดาษสูงมากขึ้น ได้มีการศึกษา ค้นคว้าวิธีการผลิตเยื่อกระดาษขึ้น ทั้งขบวนการผลิตแบบเชิงกล (mechanical process) และแบบเคมี (chemical process) ขึ้นมาในปี 1879 ชาวสวีเดนชื่อ C.F Dahl ได้เปลี่ยนแปลงขบวนการผลิตเยื่อเคมีที่สำคัญขึ้นโดยใช้สารเคมี 2 ชนิดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลฟายด์ (Na_2S) ต้มไม้ภายใต้ความดันได้สำเร็จ เยื่อกระดาษที่ได้มีความเหนียวมาก จึงเรียกขบวนการผลิตเยื่อแบบนี้ว่า "kraft process" หรือ "กระบวนการแบบคราฟท์" ซึ่งมาจากคำศัพท์ภาษาสวีเดน ซึ่งแปลว่า "เหนียว" มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "กระบวนการซัลเฟต (sulfate)" แม้ว่าจะมีขบวนการผลิตเยื่อมากมายแต่เยื่อส่วนมากที่ใช้ในปัจจุบันจะผลิตจากขบวนการแบบคราฟท์ หรือซัลเฟตเป็นส่วนใหญ่

กระดาษ (paper) หมายถึงแผ่นวัสดุบางซึ่งทำจากเส้นใย (fiber) ผสมกับสารเติมแต่ง (additive) ต่างๆ ตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไปซึ่งสารเติมแต่ง นี้อาจเติมไปก่อนการขึ้นแผ่น (sheet forming) หรือหลังการขึ้นแผ่นแล้วก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติกระดาษที่ต้องการ กระดาษที่ผลิตทั่วไปจะมีขนาดน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ตั้งแต่ระดับสูงกว่า 35-225 กรัมต่อตารางเมตร (g/m^2) กระดาษที่ผลิตที่ระดับสูงกว่า 225 กรัมต่อตารางเมตร ขึ้นไปจะถือว่าเป็นกระดาษแข็ง (paperboard)

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (chemical compositions of wood)

วัสดุเส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษทั่วไปส่วนมากจะเป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เส้นใยอื่นๆ เช่น asbestos, silk, wool, glass, plastic และ metal เป็นวัสดุในการผลิตกระดาษเพื่อทางการค้าอีกด้วย แต่มักมีราคาแพงมากเมื่อเทียบกับต้นทุนการผลิตกระดาษด้วยเส้นใยเซลลูโลส

องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (chemical composition of wood)

- องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในการผลิตเยื่อกระดาษไม่ว่าจะเป็นไม้เนื้อแข็ง (hardwood) ไม้เนื้ออ่อน (softwood) หรือไม้ล้มลุก (non-wood) ประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) และสารสกัด (Extractive) เป็นต้น

2.2.1 เซลลูโลส เป็นโฮโมโพลิเมอร์ (homopolymer) ของ ดี-กลูโคส (d-glucose) เกาะกันด้วย 1,4 β glucosidic bond มีลักษณะเป็นเส้นตรง (straighted chain) มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ในระหว่างแถวมีการยึดเหนี่ยวกันโดยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ประมาณ 35 A° เรียก elementary fibril อันเป็นหน่วยเล็กที่สุดที่ปรากฏเป็นเอกเทศตามธรรมชาติ เซลลูโลสมีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 60-80 ทนทานต่อสารเคมีโดยมีสารเคมีที่ละลายเซลลูโลสได้ไม่กี่ชนิด เช่น กรดซัลฟูริคความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 68 กรดเกลือความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 41 ซิงค์คลอไรด์ quarternary ammonium compound และ complexing agents บางชนิด เช่น $CuO\text{-}NH_3H_2O$, CuO-ethylene diamine-H_2O เป็นต้น

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส เป็นเฮทเทอร์โรโพลิเมอร์ (heteropolymer) ของน้ำตาลชนิดต่างหลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส (glucose) แมนโนส (mannose) ไซโลส (xylose) และ อราบิโนส (arabinose) เฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย มีหมู่กรด เช่น อซีติล และยูโรนิคจับอยู่ด้วย เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน สามารถอมน้ำและพองตัวได้ดี คุณสมบัตินี้เป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการทำกระดาษ ในไม้เนื้อแข็ง (hardwood) เฮมิเซลลูโลสจะเป็นพวก xylan ส่วนในไม้เนื้ออ่อนส่วนใหญ่เป็นกลูโคแมนแนน

2.2.3 ลิกนิน ประกอบด้วย phenyl propane unit เฉลี่ยประมาณ 2,500 หน่วย เป็นอสัณฐาน (amorphous) จับตัวกันเป็นโครงร่างสามมิติด้วย ether bond และ c-c bond ส่วนใหญ่เป็น phenyl-O-aryl ether bond ลิกนินพบมากในส่วนที่เรียกว่า middle lamella ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมต่อระหว่างเส้นใย เป็นสารซึ่งไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) อุณหภูมิที่อ่อนตัวประมาณ 120-200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นความชื้น

2.2.4 สารสกัดได้ (extractive) หมายถึง ส่วนประกอบในไม้หรือพืชที่สามารถละลายได้ ในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) เช่น อะซีโตน แอลกอฮอล์ ไดคลอโรมีเทน และคลอโรฟอร์ม เป็นต้น ทั้งนี้ไม่รวมถึงอนินทรีย์สาร (inorganic material) ที่อาจละลายปะปนออกมาด้วย สารสกัดได้นี้มักเป็นชันสนหรือยางไม้

- ตัวอย่างแสดงองค์ประกอบทางเคมีของ เปลือกปอสา ชานอ้อย ยูคาลิปตัส และไม้ไผ่ ดังแสดงในตารางข้างล่าง

ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้

องค์ประกอบทางเคมี, ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง	ชนิดของไม้ (type of wood)			
	เปลือกปอสา	ชานอ้อย	ยูคาลิปตัส	ไม้ไผ่
ปริมาณเถ้า (ash content)	5.8	2.9	0.6	1.8
การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน (alcohol-benzene solubility)	8.0	1.1	1.6	3.6
การละลายในน้ำร้อน (hot water solubility)	16.7	1.8	3.3	5.5
การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 (1% NaOH solubility)	43.9	30.2	16.9	27.3
ปริมาณลิกนิน (lignin content)	4.9	18.7	25.2	23.0
ปริมาณเพนโตแซน (pentosan)	12.9	22.0	14.3	19.1
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส (holocellulose)	73.0	70.1	75.0	73.6
แอลฟ่า-เซลลูโลส (alpha cellulose)	60.9	37.7	45.0	50.2
เบต้า-เซลลูโลส (beta cellulose)	3.3	17.6	10.1	11.6

ที่มา : กลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

2.3 องค์ประกอบของกระดาษ

2.3.1 ประเภทของเส้นใย (fibrous types)

ในปัจจุบันจากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้มนุษย์สามารถสังเคราะห์เส้นใยขึ้นมาใช้เองได้นอกเหนือจากเส้นใยที่มีอยู่เดิมในธรรมชาติ ดังนั้นเราอาจแบ่งแหล่งที่มาของเส้นใยได้ดังนี้

2.3.1.1 เส้นใยธรรมชาติ (natural fiber) อาจแยกตามแหล่งกำเนิดได้ดังนี้

2.3.1.1.1 เส้นใยสัตว์ (animal fiber) เส้นใยชนิดนี้จะมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ แหล่งเส้นใย ได้แก่

2.3.1.1.1.1 ขนสัตว์และผม (wool and hair) เป็นเส้นใยที่ได้จากขนและผมของสัตว์ เช่น ขนแกะ และ ผมอูฐ เป็นต้น

2.3.1.1.1.2 เส้นไหม (silk) เช่น เส้นไหมที่ได้จากตัวไหม

2.3.1.1.2 เส้นใยไม้ (wood fiber) เส้นใยชนิดนี้มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ได้จากไม้ยืนต้น และไม้ล้มลุก (non wood) เช่น ไม้สน ไม้ยูคาลิปตัส ไม้ไผ่ ปอ แก้ว ชานอ้อย และฟางข้าว เป็นต้น

2.3.1.1.3 เส้นใยจากแร่ (mineral fiber) เป็นเส้นใยแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น asbestos ชนิดต่างๆ เป็นต้น

2.3.1.2 เส้นใยสังเคราะห์ (synthetic or man-made fiber) เกิดขึ้นจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่มนุษย์นำมาผลิตเส้นใย เส้นใยที่ได้มีทั้งทำจากวัสดุจำพวก สารอินทรีย์ และอนินทรีย์สาร เส้นใยในกลุ่มนี้มีมากมายและใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เช่น Viscose-rayon,Nylon, Acry-lic, Elastomer และ Glaso-fiber เป็นต้น

2.3.2 ส่วนเส้นใย (fibrous materials)

เส้นใยที่นำมาผลิตกระดาษส่วนมาก หรืออาจจะเรียกว่าเกือบทั้งหมดเป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellu-lose) ซึ่งได้มาจากไม้ชนิดต่าง ๆ เช่น ไม้เนื้ออ่อน (softwood) ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) และพืชชนิดอื่นนอกจากไม้ยืนต้น (non wood) เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกระดาษ เพราะกระดาษโดยทั่ว ๆ ไปจะมีเส้นใยผสมอยู่สูงถึงร้อยละ 80-95 ขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษ

2.3.2.1 เส้นใย (fiber or tracheid) เส้นใยเป็นเซลล์รูปยาวเรียว ปิดหัวปิดท้าย มีผนังเซลล์ ตรงกลางเป็นช่องว่าง (cavity) เรียกว่า ลูเมน (lumen) เส้นใยของไม้แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปตามความหนาของผนังเซลล์ ความกว้างของลูเมนและลักษณะของรูเปิด (pti) ถ้าเป็นเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน จะเรียกว่า tracheid เส้นใยทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ต้นไม้ เส้นใยส่วนมากจะเรียงตัวตามความยาวในแนวขนานกับลำต้น

2.3.2.2 parenchyma cell เป็นเซลล์ปิด มีขนาดเล็กมาก รูปทรงโดยทั่วไปเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำหน้าเก็บสำรองอาหาร

2.3.2.3 vessel element เป็นเซลล์ขนาดใหญ่ รูปร่างคล้ายเส้นใย ที่ปลายเปิดทั้งสองข้าง และมีลักษณะของรูเปิดที่แตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของไม้ ทำหน้าลำเลียงน้ำ

2.3.3 ส่วนที่ไม่ใช้เส้นใย (nonfibrous materials)

ส่วนที่ไม่ใช้เส้นใยจะเป็นสารเคมีที่ใส่เติมลงไป เพื่อให้กระดาษที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้ดีขึ้น สารเคมีที่อาจพบได้แก่

2.3.3.1 สารกันซึม (sizing agent) เป็นสารเคมีที่ช่วยให้กระดาษต้านการซึมน้ำได้ดีขึ้น ได้แก่ สารส้มและชันสน (alum/rosin) คีทีนไดเมอร์ (ketene dimers) และอัลเคนิล ซัคซินิคแอนไฮดรายด์ (alkenyl succinic anhydride) เป็นต้น

2.3.3.2 ฟิลเลอร์ (filler) เป็นผงแร่สีขาวช่วยปรับปรุงลักษณะกระดาษให้เหมาะสมกับการพิมพ์ เช่น ความทึบแสง (opacity) และการดูดซึมหมึก สารที่ใช้ ได้แก่ ติตาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) ดินขาว (clay) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) นอกจากนี้ฟิลเลอร์มีราคาถูกกว่าเยื่อกระดาษ

2.3.3.3 สารเพิ่มความเหนียวของกระดาษ (dry strength agent) ช่วยให้กระดาษมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น ได้แก่ แป้ง (starch) และกัม (gum) เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น ทำให้ความต้านแรงดันทะลุของกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อผสมแป้งลงในเยื่อ

2.3.3.4 สารเพิ่มความเหนียวของกระดาษเมื่อเปียก (wet strength agent) ได้แก่ ยูเรียฟอร์มาดีไฮด์ (urea-formaldehyde) และเมลามีนฟอร์มาดีไฮด์ (melamine formaldehyde) ปกติจะไม่พบในกระดาษพิมพ์ทั่วๆไป แต่อาจพบในกระดาษพิมพ์ที่ต้องการความเหนียวเมื่อเปียก เช่น กระดาษพิมพ์แผนที่ เป็นต้น

2.3.3.5 สีย้อม (dyes) กระดาษทั่วไปจะใช้สีแต่งให้ดูขาวขึ้น (tinting) สีที่ใช้เป็นสีที่ละลายน้ำได้ อาจเป็นสีม่วงหรือสีน้ำเงิน ส่วนใหญ่จะเป็นสีไดเร็ค (direct dye) และสีเบสิค (basic dye)

2.3.2.6 สารฟอกนวล (optical brightening agent; OBA) กระดาษพิมพ์เขียนเกือบทุกชนิดจะมีสารฟอกนวล ซึ่งเติมในเยื่อก่อนเดินแผ่นเพื่อให้กระดาษดูขาวขึ้น เนื่องจากสารฟอกนวลเปลี่ยนรังสีอุตราไวโอเลทในแสงแดดซึ่งเป็นแสงในช่วงที่ตามองไม่เห็น ให้เป็นในช่วงคลื่นสีม่วงและสีน้ำเงินซึ่งเป็นแสงในช่วงที่ตามองเห็น

2.4 แหล่งเส้นใย

ไม้จัดเป็นวัสดุสำคัญในการทำเยื่อกระดาษ (wood pulp) ไม้ทุกชนิดสามารถนำมาทำเป็นเยื่อกระดาษได้ เราสามารถจำแนกไม้ออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.4.1 ไม้ยืนต้น (wood) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.4.1.1 ไม้เนื้ออ่อน(softwood) เป็นไม้จำพวก coniferous หรือ gymnosperm มีใบเป็นรูปเข็ม ไม่ผลัดใบ เช่น spruce, pine และ fir ในประเทศไทยมีเพียง 2 ชนิด คือ สนสองใบ และ สนสามใบ เส้นใยของไม้เนื้ออ่อนมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3 มิลลิเมตร เยื่อที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน เรียกว่า "เยื่อใยยาว" และการเรียกชื่อทางการค้ามักมีอักษร " N " (needle) นำหน้า เช่น NBKP (needle bleached kraft pulp) เพื่อระบุว่าเป็นเยื่อใยยาว

2.4.1.2 ไม้เนื้อแข็ง (hardwood)เป็นไม้จำพวก angiosperm โดยทั่วไปมีใบกว้าง(broad leaved) ยกเว้น ไม้บางชนิด เช่น สนทะเลและสนปดิพัทธ์ ในเขตอบอุ่นไม้พวกนี้จะผลัดใบ (decidu-ous) เส้นใยของ hardwood มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเช่น Eucalyptus, birch, aspen และไม้ใบกว้างต่าง ๆ ในประเทศไทย เยื่อที่ได้จากไม้เนื้อแข็ง เรียกว่า เยื่อใยสั้น และการเรียกชื่อทางการค้ามักมีอักษร " L " (leaved) นำหน้า เช่น LBKP (leaved bleached kraft pulp) เพื่อบ่งชี้ว่าเป็นเยื่อไม้เนื้อแข็ง

2.4.2 ไม้ (non-wood) เส้นใยที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้จาก

2.4.2.1 ส่วนที่เหลือทิ้งทางการเกษตร (agriculture residue) เช่น ฟางข้าว และชานอ้อย เป็นต้น

2.4.2.2 พืชตระกูลหญ้า (natural growing plants) เช่น ไม้ไผ่ และหญ้าขจรจบ เป็นต้น

2.4.2.3 พืชเส้นใยต่างๆ (crop fibres)

2.4.2.3.1 เส้นใยที่ได้จากส่วนเปลือกและต้น(bast or stem) เช่น hemp, ramie,flax, ปอกระเจา (jute) ปอแก้ว (kenaf) และ ปอสา เป็นต้น

2.4.2.3.2 ใยที่ได้จากส่วนใบ (leaf fibre) เช่น abaca สัปปะรด และป่านศรนารายณ์ (sisal) เป็นต้น

2.4.2.3.2 เส้นใยที่ได้จากเมล็ด (seed fibre) เช่น ฝ้าย เป็นต้น

2.5 กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping process)

ไม้เป็นแหล่งวัสดุสำคัญในการนำมาทำเป็นเยื่อกระดาษ (wood pulp) เยื่อกระดาษมีหลายชนิด การเรียกชื่อขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต ซึ่งประกอบด้วยการใช้พลังงานความร้อน พลังงานกล และพลังงานเคมี สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ตามกรรมวิธีการผลิต ดังนี้

2.5.1 การผลิตเยื่อไม้บด (mechanical pulping)

2.5.1.1 การทำให้เส้นใยแตกหลุดจากกันเป็นอิสระด้วยพลังงานกลโดยลำพัง แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของเครื่องบดเยื่อ คือ

2.5.1.1.1 ground wood pulp (GWP) เป็นเยื่อไม้บดที่ได้จากการนำท่อนไม้ (bolt) ไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกหิน (ston grinder) ปัจจุบันมีเครื่องบดเยื่อแบบลูกหินที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เยื่อที่ได้เรียกว่า pressure groundwood pulp (PGWP)

2.5.1.1.2 refiner mechanical pulp (RMP) เป็นเยื่อไม้บดที่ได้จากการนำชิ้นไม้ (chip) ไปบดด้วยเครื่องบดแบบจาน (refiner)

- เยื่อไม้บดทั้ง 2 ชนิดนี้ ให้ผลผลิตเยื่อประมาณ ร้อยละ 93-95

2.5.1.2 การทำให้เส้นใยแตกหลุดจากกันเป็นอิสระด้วยพลังงานกลและพลังงานความร้อน (thermo -mechanical pulp; TMP) เป็นเยื่อไม้บดที่ได้จากการนำชิ้นไม้ (chip) ไปบดที่อุณหภูมิ 120-140 องศาเซลเซียสก่อนบดด้วยเครื่องบดแบบจานบดภายใต้ความดัน (pressurized refiner) เยื่อไม้บดชนิดนี้ให้ผลผลิตเยื่อประมาณ ร้อยละ 90-93

2.5.1.3 การทำให้เส้นใยแตกหลุดจากกันเป็นอิสระด้วยพลังงานกลและสารเคมี (chemimechanical pulp; CMP) เป็นเยื่อไม้บดที่ได้จากการนำชิ้นไม้ (chip) ไปแช่ด้วยสารเคมีเจือจาง (สารเคมีที่ใช้ได้แก่ Na_2SO_3 NaOH และ $NaHSO_3$ เป็นต้น) แล้วนำชิ้นไม้ไปบดด้วยเครื่องบดแบบจานบดภายใต้ความดัน (pressurised refiner) เยื่อไม้บดชนิดนี้ให้ผลผลิตเยื่อประมาณ ร้อยละ 80-90

2.5.1.4 การทำให้เส้นใยแตกหลุดจากกันเป็นอิสระด้วยพลังงานกล พลังงานความร้อนและสารเคมี (chemithermomechanical pulp; CTMP) เป็นเยื่อไม้บดที่ได้จาการนำชิ้นไม้ (chip)ไปแช่สารเคมี เช่น NaOH และ Na_2SO_3 เป็นต้น แล้วนำชิ้นไม้ไปบดด้วยเครื่องบดแบบจานภายใต้ความดัน (pressurized refiner) ที่อุณหภูมิสูง 120-140 องศาเซลเซียส เยื่อชนิดนี้ให้ผลผลิตเยื่อ ประมาณ ร้อยละ 85-90

2.5.2 การผลิตเยื่อกึ่งเคมี (semichemical pulping)

เยื่อชนิดนี้ได้จากการนำชิ้นไม้ (chip) ไปต้มด้วยสารเคมีแล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบจานเพื่อให้เส้นใยแยกจากกัน เยื่อไม้บดชนิดนี้ให้ผลผลิตเยื่อประมาณ ร้อยละ 65-80

2.5.3 การผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping)

เยื่อเคมีได้จากการนำชิ้นไม้ (chip)ไปต้มด้วยสารเคมีที่อุณหภูมิสูง 150-170 °C เส้นใย จะแยกตัวออกจากกันเป็นอิสระด้วยพลังงานเคมีและความร้อน โดยสารเคมีจะละลายลิกนินในส่วนที่เชื่อมต่อเส้นใยและผนังเส้นใยออกมา หรือที่เรียกว่า delignification เยื่อเคมีที่ได้จะเรียกตามสารเคมีที่ใช้ เช่น เยื่อโซดา [ได้จากการใช้ sodium hydroxide (NaOH) ในกระบวนการผลิตเยื่อ] เยื่อซัลเฟตหรือเยื่อคราฟท์ (kraft pulp) [ได้จากการใช้สารเคมีผสมของ sodium hydroxide (NaOH) และ sodium sulphide (Na_2S) ในกระบวนการผลิตเยื่อ] เป็นต้น เยื่อเคมีที่ได้จะค่อนข้างคล้ำโดยเฉพาะเยื่อซัลเฟต เยื่อเคมีให้ผลผลิตเยื่ออยู่ในช่วงประมาณ ร้อยละ 35-60

- คุณลักษณะเฉพาะของเยื่อ (characteristic property of pulp)

เยื่อไม้ (wood pulp) ที่ได้จากกระบวนการผลิตที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติของเยื่อและลักษณะเส้นใยที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้เส้นใยที่ผลิตในกระบวนการเดียวกันแต่ต่างพันธุ์ ต่างอายุ และสถานที่ปลูก ก็ให้คุณสมบัติของเส้นใยที่แตกต่างกันออกไปด้วย เราสามารถจำแนกลักษณะของเยื่อที่ได้จากกระบวนการผลิต ดังนี้

○ เยื่อไม้บด (mechanical pulp) คำว่าเยื่อไม้บดในที่นี้จะกล่าวรวมถึงกระบวนการผลิตเชิงกลที่ให้ผลผลิตเยื่อสูงตั้งแต่ร้อยละ 85 ขึ้นไป ซึ่งรวมถึงเยื่อ PGWP, TMP, RMP และCTMP เป็นต้น เยื่อไม้ที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้เส้นใยที่ได้จะมีส่วนผสมของลิกนินเกือบทั้งหมดปนอยู่ด้วย ทำให้เยื่อที่ได้มีลักษณะของไม้ (woody character) อยู่มาก เยื่อที่ได้ค่อนข้างหยาบกระด้าง เส้นใยที่ได้จากเยื่อชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีการฉีกขาด และตัดเป็นท่อนๆ ไม่สามารถแยกเป็นเส้นใยสมบูรณ์แต่ละเส้นได้ (individual fiber) นอกจากนี้ยังมีชิ้นไม้เล็ก ๆ หรือกลุ่มของเส้นใย (bundles of fiber) จำนวนมาก ดังนั้นจึงอาจแบ่งองค์ประกอบของเยื่อชนิดนี้เป็น 3 ส่วน คือ

1. เส้นใยฝอย (fines)

2. เส้นใย (fibers)

3. เสี้ยนหรือกลุ่มของเส้นใย (shives or bundle of fibers)

เยื่อชนิดนี้เมื่อนำมาเป็นวัสดุในการทำกระดาษจะให้คุณสมบัติตามองค์ประกอบทั้ง 3 ข้อ คือ เส้นใยฝอย จะเพิ่มคุณสมบัติทางด้านการทึบแสง แต่เนื่องจากเส้นใยแต่ละเส้นไม่สมบูรณ์ และยังคงมีลิกนินสูงมากจึงทำให้การเกิดพันธะระหว่างเส้นใยต่ำ (fiber bonding) เยื่อชนิดนี้จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในการทำกระดาษประเภทรับแรงสูง เยื่อชนิดนี้มีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับเยื่อเคมีจึงมักนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับงานพิมพ์คุณภาพต่ำ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษห่อของ และใช้เป็นเยื่อชั้นในของกระดาษแข็ง

○ เยื่อเคมี (chemical pulp or woodfree pulp) เยื่อชนิดนี้ได้จากขบวนการผลิตที่ใช้พลังงานความร้อนและสารเคมีเป็นตัวละลายลิกนินในส่วนที่เชื่อมต่อเส้นใยออกมา เยื่อที่ได้มีลักษณะนุ่มแต่มีสีค่อนข้างคล้ำ โดยเฉพาะเยื่อเคมีจากซัลเฟต (เยื่อเคมีที่ได้จะเรียกตามสารเคมีที่ใช้ เช่น ถ้าใช้โซดาไฟในการผลิตเยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อโซดา เป็นต้น) เส้นใยที่ได้จากเยื่อเคมีทุกชนิดจะสามารถแยกตัวเป็นเส้นใยแต่ละเส้น (individual fiber)ได้อย่างสมบูรณ์ ไม่มีลักษณะของไม้หรือ woody character เหลืออยู่ ซึ่งเป็นที่มาของคำเรียกว่า wood-free pulp ในอุตสาหกรรมกระดาษ เยื่อชนิดนี้นับว่ามีการผลิตในลำดับสูงสุด และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางเพราะเยื่อชนิดนี้ สามารถนำไปพัฒนาคุณภาพเส้นใยทางด้านสมบัติกายภาพได้ดีตามแต่วัตถุประสงค์การใช้งาน โดยนำไปทำเป็นวัฏดิบในการผลิตกระดาษ ทั้งกระดาษเพื่อการบรรจุหีบห่อ เช่น กระดาษผิวกล่อง (linerboard) และกระดาษเพื่อการพิมพ์และเขียน เช่น กระดาษออฟเซ็ต กระดาษอาร์ต เป็นต้น เยื่อที่ยังไม่เคยใช้ทำกระดาษเลยเรียกว่า virgin pulp

2.6 อิทธิพลของการบดเยื่อ

ในกระบวนการผลิตกระดาษ การบดเยื่อเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่หลีกเลี่ยงมิได้ ทั้งนี้เพราะการบดเยื่อมีผลต่อคุณภาพของกระดาษที่ได้ จึงต้องบดเยื่อให้เหมาะสมเพื่อที่จะได้กระดาษมีคุณภาพตรงตามความต้องการใช้งาน ซึ่งการบดเยื่อจะเกิดขึ้นทั้งต่อเส้นใย แผ่นเปียก และกระดาษ

2.6.1 อิทธิพลการบดเยื่อต่อเส้นใย โดยแบ่งระดับของการบดเยื่อออกเป็น 3 ระดับ คือ

2.6.1.1 การบดเยื่อน้อย เส้นใยจะเกิดการน่วมภายใน(internal fibrillation) โดยเส้นใยเกิดการพองตัว (swell) เหยียดตรงขึ้น (straightened) อ่อนตัวตามแรง (flexible) และยุบแบนได้ง่าย (collapse)

2.6.1.2 การบดเยื่อปานกลาง ทำให้เส้นใยเกิดการแตกแขนง (external fibrillation) โดยผนังชั้นนอกสุด (primary wall) หลุดออก ผนังชั้น S_1 แตกแขนง (fibrillation) เกิดเส้นใยฝอย (fines) และเส้นใยพองตัวเพิ่มขึ้นอีก (further swelling)

2.6.1.3 การบดเยื่อมาก ทำให้เกิดการตัดทำลายเส้นใย (fiber destruction) โดยผนังชั้น S_2 แตกแขนงเส้นใยแตก (crushing) เส้นใยถูกตัดให้สั้นลง (cutting,shortening) และเกิดเส้นใยฝอยมากขึ้น

2.6.2. อิทธิพลการบดเยื่อต่อแผ่นเปียก

2.6.2.1 การผนึกตัวของแผ่นเปียก (consolidation) การบดเยื่อทำให้เกิดเส้นใยฝอยและมีการแตกแขนงของชั้น S1 มีผลทำให้แรงแคมเบล (Campbell's forces) เพิ่มขึ้น และจากการที่เส้นใยอ่อนตัวตามแรงทำให้เส้นใยโน้มตัวเข้าหากันได้ง่าย

2.6.2.2 การเกิดพันธะ (bonds) เยื่อกระดาษหลังการบดเส้นใยพองตัวเป็นการเพิ่มผิวสัมผัส (contact surface) และเมื่อสูญเสียน้ำบางส่วนออกไปแผ่นเปียกก็จะหดตัว ส่วนการอ่อนตัวตามแรงของเส้นใยมีผลให้จำนวนพันธะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การขุบแบนของเส้นใยเกิดขึ้นได้ง่ายทำให้ขนาดของพันธะมีพื้นที่สัมผัสมากขึ้น

2.6.2.3 ส่วนของเส้นใย (segment) เยื่อหลังการบดจะเหยียดตรงขึ้น (straightened) มีผลต่อความตึงหย่อนของแผ่นเปียกและการที่เกิดเส้นใยฝอยขึ้น ทำให้เส้นใยเกิดพันธะได้ง่ายเพราะเส้นใยฝอยทำหน้าที่เชื่อมเส้นใยให้ติดกัน

2.6.2.4 อื่น ๆ จากการที่เส้นใยถูกตัดให้สั้นลงมีผลให้ความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษดีขึ้น และการเกิดพันธะมากขึ้นทำให้ความต้านแรงดึงของแผ่นเปียก (wet-web strength)เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เยื่อหลังการบดมี "ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ" หรือเรียกว่า "ค่าฟรีเนส (freeness)" ลดลง ทำให้เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก (drainage time) มีค่าเพิ่มขึ้น การแยกน้ำออกจากแผ่นเปียกในเครื่องเดินแผ่นกระดาษทำได้ยาก ต้องใช้เวลาและพลังงานมากขึ้นด้วย

2.6.3. อิทธิพลการบดเยื่อต่อสมบัติกระดาษ

ลักษณะของกระดาษที่ได้จากเยื่อซึ่งผ่านขบวนการบดจะแตกต่างจากกระดาษซึ่งทำจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่านขบวนการบดเยื่อ โดยกระดาษจะมีความแตกต่างกันทั้งสมบัติทางกายภาพและทางด้านแสง

2.6.3.1 สมบัติทางกายภาพ กระดาษที่ทำจากเยื่อที่ผ่านขบวนการบดจะมีความหนาแน่น ความเรียบ ความต้านทานอากาศ ความต้านทานแรงดึงและความยืด สูงกว่ากระดาษซึ่งทำจากเยื่อที่ไม่ผ่านขบวนการบด

2.6.3.2 สมบัติทางด้านแสง โดยกระดาษที่ทำจากเยื่อซึ่งไม่ผ่านขบวนการบดจะมีความขาวสว่างและความทึบแสงสูงกว่ากระดาษซึ่งทำจากที่ผ่านขบวนการบด

➢ ตัวอย่างแสดง ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ (freeness) และเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก ของเยื่อฟางข้าว เปลือกปอสา ชานอ้อย ยูคาลิปตัส ไม้ใผ่ และไม้สน (เยื่อใยยาว) ณ ที่จำนวนรอบของการบดเท่ากับ 0 รอบ ดังแสดงในตารางข้างล่าง

ตาราง แสดงค่าฟรีเนสของเยื่อเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก ของเยื่อต่างๆ

	ฟางข้าวเก่า	ฟางข้าวใหม่	เปลือกปอสา	ชานอ้อย	ยูคาลิปตัส	ไม้ใผ่	ไม้สน (เยื่อใยยาว)
จำนวนรอบของการบด, รอบ	0 (initial point)						
ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ (freeness) , มิลลิลิตร (mL.CSF)	160	280	320	480	560	660	700
เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก (drainage time), วินาที	34.4	4.9	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5

ที่มา : กลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการ

3.1 วัสดุ

บริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด จ.พระนครศรีอยุธยา ส่งตัวอย่างฟางข้าวเก่าให้กรมวิทยาศาสตร์บริการ ดำเนินการในเดือน กรกฎาคม 2544 มีน้ำหนักประมาณ 20 กิโลกรัม บรรจุในภาชนะถุงพลาสติกปิดผนึกเรียบร้อย มีปริมาณความชื้นของตัวอย่างประมาณร้อยละ 29 โดยตัวอย่างที่ส่งมามีลักษณะเปื่อยยุ่ยสีน้ำตาลเข้มและมีส่วนละเอียดปะปนเป็นจำนวนมาก เนื่องจากตัวอย่างถูกกองไว้กลางแจ้งโดยไม่ถูกเคลื่อนย้าย ในสภาพที่ตากแดด/ตากฝนตามฤดูกาลและถูกเก็บเอาไว้นานประมาณ 4 ปี ตัวอย่างฟางข้าวเก่านี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากต้นข้าว ซึ่งมีปริมาณมากจากแหล่งเพาะปลูกของภาคกลางและจังหวัดใกล้เคียง ในส่วนของ "ฟางข้าวใหม่" ที่นำมาศึกษาเพื่อใช้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและการวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใย ซึ่งเป็นฟางข้าวที่ได้หลังฤดูเก็บเกี่ยวนาปรังจากพื้นที่นาข้าวบริเวณคลอง 5 จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเก็บเกี่ยวได้ประมาณ 10 วัน มีสีเหลืองอ่อนและมีความชื้นประมาณร้อยละ 15

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 หม้อนึ่งอัดความดัน (autoclave)

3.2.2 เครื่องกระจายเยื่อ (disintegrator)

3.2.3 เครื่องชั่ง (balance) ใช้ชั่งในช่วง 1-20 กรัม อ่านค่าละเอียด 0.0001 กรัม

3.2.4 เครื่องคัดแยกขนาด (vibratory flat screen)

3.2.5 เครื่องบดเยื่อ (beater) แบบ PFI-mill

3.2.6 เครื่องทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน (standard handsheet machine)

3.2.7 กรวยกรองแบบแก้ว (fritted glass buchner funnel)

3.2.8 เครื่องทดสอบการอุ้มน้ำของเยื่อ (freeness tester)

3.2.9 ชุดทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight)

3.2.10 เครื่องทดสอบความหนา (thickness tester)

3.2.11 เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงขาด (tensile tester)

3.2.12 เครื่องทดสอบความต้านแรงฉีกขาด (tear tester)

3.2.13 เครื่องทดสอบความต้านแรงดันทะลุ (burst tester)

3.2.14 เครื่องทดสอบความชื้น (moisture balance)

3.2.15 เครื่องทดสอบความขาวสว่าง (brightness tester)

3.2.16 เครื่องดูดสูญญากาศ (vacuum pump)

3.2.17 เครื่องให้ความร้อนด้วยโพลีเอทีลีนไกลคอล (polyethyleneglycol bath)

3.2.18 กล้องจุลทรรศน์ (microscope)

3.2.19 ตู้อบ (oven)

3.2.20 เตาเผา (muffel)

3.2.21เครื่องบดไม้แบบวิลเล่ (Wiley mill)

3.2.22 เตาให้ความร้อน (hot plate)

3.2.23 บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50, 100, 250 และ 1000 mL

3.2.24 แท่งแก้วสำหรับคน (stirring rod)

3.2.25 แท่งแม่เหล็ก (*magnetic bar*)

3.2.26 เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer)

3.2.27 ช้อนตักสารเคมี (spoon)

3.2.28 แท่งวัดอุณหภูมิ (termometer)

3.2.29 ขวดรูปชมพู่ (Elrenmeyer flask) ขนาด 250, 300 และ 500 mL

3.2.30 กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 100, 500 และ 1000 mL

3.2.31 บิวเรต (burette) ขนาด 50 mL

3.2.30 ปิเปต (pipette) ขนาด 2, 5, 10, 25 และ 100 mL

3.2.31 แผ่นสไลด์ (slide plate)

3.3 สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม

3.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) แบบ analar grade
เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 (W/V)

3.3.2 โซเดียมซัลไฟท์ (sodium sulphite) แบบ analar grade
เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 (W/V)

3.3.3 โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate) แบบ analar grade
เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 N

3.3.4 โซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulphate) แบบ analar grade เตรียมให้มีความเข้มข้น 0.1 N

3.3.5 กรดซัลฟูริค (sulphuric acid) แบบ analar grade
เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 20 (W/V)

3.3.6 กรดไฮโดรคลอริค (hydrochloric acid) แบบ analar grade เตรียมให้มีความเข้มข้น 0.1 N

3.3.7 โปตัสเซียมไดโครเมต (potassium dicromate) แบบ analar grade
เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 (W/V)

3.3.8 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (ferrous amonium sulphate) แบบ analar grade
เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 (W/V)

3.4 วิธีดำเนินการ

3.4.1 ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่

3.4.1.1 นำตัวอย่างวัสดุซึ่งเป็นฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่ที่ได้รับไปตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.4.1.2 สุ่มตัวอย่างฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่ที่แห้งแล้ว นำไปบดจนได้ผงละเอียด (คล้ายขี้เลื่อย) ด้วยเครื่องบดไม้แบบ วิลเล่ (Wiley mill) พอสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3.4.1.3 นำผงไม้ที่ได้จากข้อ 2.4.1.2 ไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด # 40 mesh แล้วเก็บส่วนที่ผ่านตะแกรง # 40 mesh มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี[ภาคผนวก ข] ตามรายการดังนี้ ปริมาณเถ้า/การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน/ การละลายในน้ำร้อน/การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1/ ปริมาณลิกนิน/ปริมาณเพนโตแซน/ ปริมาณโฮโลเซลลูโลส/ปริมาณแอลฟ่าเซลลูโลส /ปริมาณเบต้าเซลลูโลส/ปริมาณแกมม่าเซลลูโลส

3.4.2 ศึกษาผลการผลิตเยื่อเคมีแบบซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่า

- บริษัทฯ กำหนดสภาวะการผลิตเยื่อกระดาษที่ใช้ในโรงงาน ดังนี้

• สภาวะการต้มเยื่อ

- โซเดียมซัลไฟท์ (sodium sulphite) , ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	9
- โซเดียมไฮดรอกไซด์, ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	3
- อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อ (cooking temperature), องศาเซลเซียส	165
- เวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิถึง 165 องศาเซลเซียส (raising time to temperature), ชั่งโมง	1
- เวลาที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส (cooking time), ชั่วโมง	2.5
- อัตราส่วนฟางข้าวต่อน้ำ (wood : liquor ratio)	1:3.5

นำฟางข้าวเก่า มาใช้เป็นวัสดุในการผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบโมโนซัลไฟท์ ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษในโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน โดยชั่งตัวอย่างฟางข้าวเก่าหนัก 1,200 กรัมน้ำหนักอบแห้ง บรรจุลงในหม้อนึ่งอัดความดัน (autoclave) แล้วเทส่วนผสมของน้ำยาต้มเยื่อตามสภาวะการทดลองที่กำหนด ปิดฝาหม้อนึ่งอัดความดันแล้วอัดอากาศให้มีความดัน 3.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปล่อยอากาศออกจากหม้อนึ่งอัดความดันแล้วใส่ลงในเครื่องให้ความร้อนด้วยโพลีเอทีลีนไกลคอล โดยที่หม้อนึ่งอัดความดัน ถูกติดตั้งอยู่บนเพลาซึ่งหมุนตลอดเวลา มีการควบคุมอุณหภูมิและเวลาตามสภาวะการทดลองที่กำหนด เมื่อต้มครบกำหนดเวลาแล้ว นำหม้อต้มลงแช่ในน้ำเย็นประมาณ 3 นาที แล้วเทน้ำดำออกเก็บน้ำดำไว้เพื่อวิเคราะห์หา ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในการต้มเยื่อ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นำเยื่อที่ได้มาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา แล้วนำไปกระจายเพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกันเป็นเวลา 3 นาที ในเครื่องกระจายเยื่อ (disintegrator) แล้วนำไปร่อนคัดกากด้วยเครื่องคัดแยกขนาด (vibratory flat screen) มีขนาดร่อง 0.008 นิ้ว เพื่อแยกกากเยื่อหรือส่วนที่ต้มไม่สุก (rejected yield) ออกจากผลผลิตเยื่อ (accepted yield) นำเยื่อที่ได้ไปคำนวณ/วิเคราะห์ ดังนี้

1. ผลผลิตเยื่อ (total yield ; accepted and rejected yield)

2. KAPPA NUMBER เพื่อหาปริมาณลิกนินในเยื่อ (total lignin in pulp) ตามมาตรฐาน TAPPI T 236 cm-85

3. ความขาวสว่าง โดยแบ่งเยื่อไปทำแผ่นทดสอบความขาวสว่างตามมาตรฐาน Scan C11-75 ซึ่งเป็นสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ แล้ววัดค่าความขาวสว่างด้วยเครื่อง Elropho 2000 ตามมาตรฐาน ISO 2470

4. การประเมินคุณภาพเยื่อ โดยนำเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวไปทำแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 205 om-88 เพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้ ทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน ตาม TAPPI T 205 om-88 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ตาม TAPPI T 410 om-89 ความหนา (thickness) ตาม TAPPI T 411 om-93 ความต้านแรงดึงขาด (tensile strength) ตาม TAPPI T 404 om-92 ความต้านแรงฉีกขาด (tear strength) ตาม TAPPI T 414 om-82 ความต้านแรงดันทะลุ (burst strength) ตาม TAPPI T 403 om-85

ในการทดสอบสมบัติทางเชิงกลและทางทัศนศาสตร์ ของแผ่นทดสอบมาตรฐานที่เตรียมได้ จะต้องเก็บแผ่นทดสอบไว้ในห้องควบคุมสภาวะการทดสอบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส 27 ± 1

ความชื้นสัมพัทธ์, ร้อยละ 65 ± 2

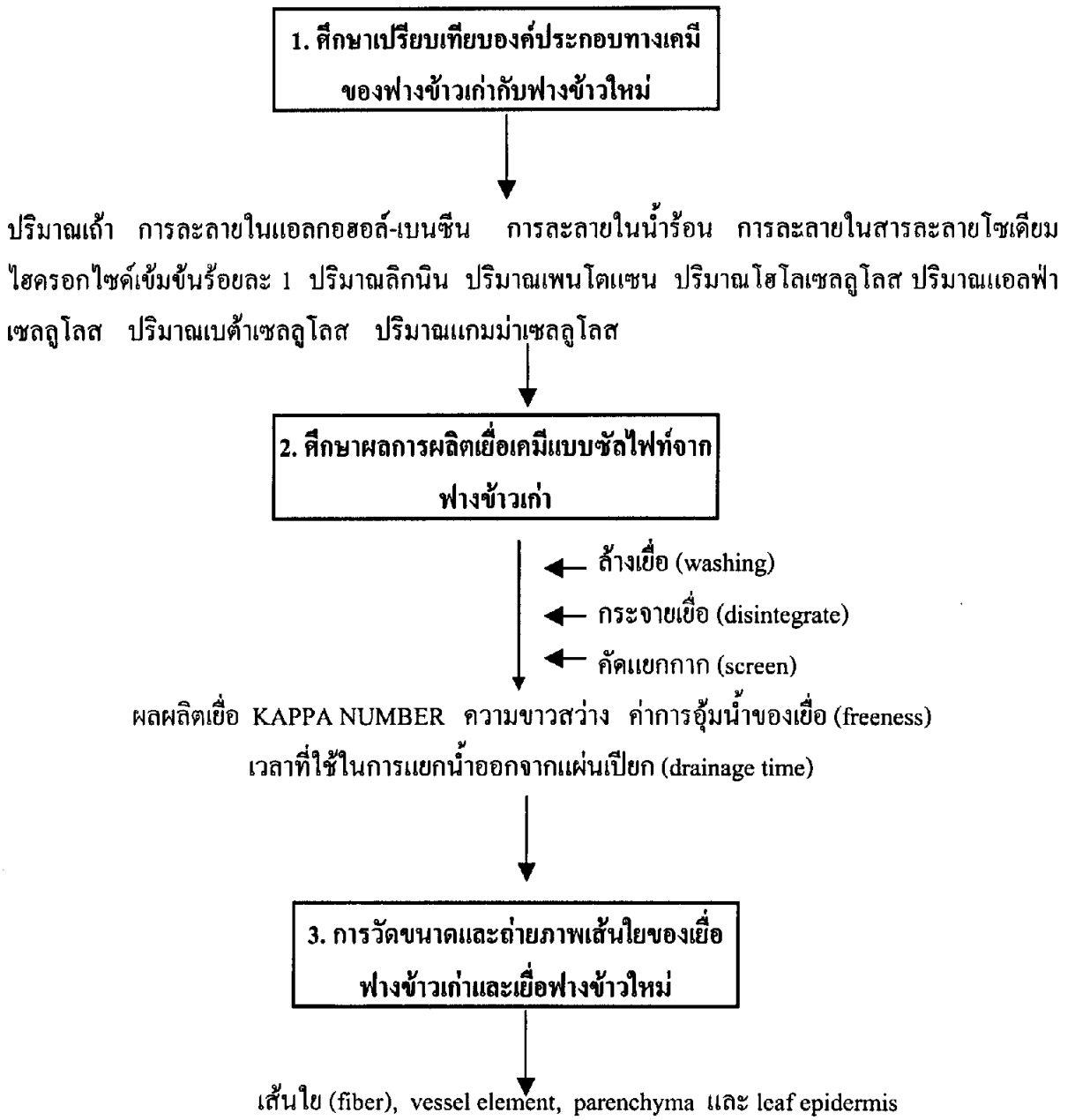
❖ เยื่อที่ผลิตได้จะมีการทดสอบค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ (freeness test)[ภาคผนวก ก (หน้า 35)] และเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก (drainage time)[ภาคผนวก ก (หน้า 35)] พร้อมกันด้วย ทั้ง 2 รายการได้ทำการทดสอบในเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า (4 ปี) ที่ได้จากการผลิตเยื่อในห้องปฏิบัติการและเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ที่ได้รับจากโรงงาน [เป็นข้อมูลของสำนักเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ (กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัยเดิม) เมื่อปี พ.ศ.2534 เป็นเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวที่ได้รับจากโรงงานเป็นเยื่อที่ยังไม่ผ่านการฟอก (unbleached pulp) โดยใช้ฟางข้าวใหม่เป็นวัสดุในการผลิต] มาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการของกลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

3.4.3 การวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใย (fiber dimension measurement) ของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่

3.4.3.1 ชั่งตัวอย่างฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่หนักอย่างละ 30 กรัมน้ำหนักอบแห้ง นำไปแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่งโมงแล้วจึงนำไปใส่บีกเกอร์ (แยกทำแต่ละตัวอย่าง) แล้วต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คิดเป็นปริมาณร้อยละ 12 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง โดยใช้ปริมาณน้ำคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างฟางข้าวต่อน้ำ (wood : liquor ratio) เท่ากับ 1: 10 หลังจากนั้นต้มให้เดือดเป็นเวลานานประมาณ 4 ชั่งโมง ฟางข้าวทั้งสองชนิดจะเปื่อยยุ่ย จึงนำไปล้างน้ำด่างออกให้หมด

3.4.3.2 นำฟางข้างทั้งสองชนิดที่เปื่อยยุ่ยไปกระจายในน้ำด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก เมื่อเส้นใยกระจายตัวแยกออกจากกันจนเป็นเส้นใยเดี่ยวแล้วจึงนำไปทำสไลด์ประมาณ 20 แผ่น ทำการวัดขนาดเส้นใยและถ่ายภาพเส้นใย (fiber), vessel element, parenchyma และ leaf epidermis โดยใช้กล้องจุลทรรศน์

แผนผังแสดงวิธีการดำเนินการ



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่า (เก็บนานประมาณ 4 ปี) ของบริษัทฯ และฟางข้าวใหม่ (เก็บนานประมาณ 10 วัน) จากพื้นที่นาข้าวบริเวณคลอง 5 จังหวัดปทุมธานี มีผลการวิเคราะห์ แสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่

องค์ประกอบทางเคมี, ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	ฟางข้าว	
	เก่า (4 ปี)	ใหม่
ปริมาณเถ้า	51.1	11.0
การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน	2.90	7.65
การละลายในน้ำร้อน	23.6	10.7
การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1	72.7	51.5
ปริมาณลิกนิน	4.91	12.8
ปริมาณเพนโตแซน	1.96	13.5
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส	40.8	58.9
แอลฟ่าเซลลูโลส	36.3	40.1
เบต้าเซลลูโลส	2.51	6.38
แกมม่าเซลลูโลส	1.99	12.4

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่ พบว่า

- ปริมาณเถ้า ฟางข้าวเก่ามีปริมาณสูงกว่าฟางข้าวใหม่เท่ากับ 4.6 เท่า (51.1/11.0)
- การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน ฟางข้าวเก่ามีค่าต่ำกว่าฟางข้าวใหม่เท่ากับ 2.6 เท่า (2.90/7.65)
- การละลายในน้ำร้อน ฟางข้าวเก่ามีค่าสูงกว่าฟางข้าวใหม่ เท่ากับ 2.2 เท่า (23.6/10.7)
- การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ของฟางข้าวเก่ามีค่าสูงกว่าฟางข้าวใหม่ เท่ากับ 1.4 เท่า (72.7/51.5)
- ปริมาณลิกนิน ฟางข้างเก่า มีปริมาณต่ำกว่าฟางข้าวใหม่เท่ากับ 2.6 เท่า (4.91/12.8)
- ปริมาณเพนโตแซน ฟางข้างเก่า มีปริมาณต่ำกว่าฟางข้าวใหม่เท่ากับ 6.9 เท่า (1.96/13.5)

- ปริมาณโฮโลเซลลูโลส แอลฟ่าเซลลูโลส เบต้าเซลลูโลส และแกมม่าเซลลูโลส ฟางข้าวเก่า มีปริมาณต่ำกว่าฟางข้าวใหม่เท่ากับ 1.4, 1.1, 2.5 และ 6.2 เท่า ตามลำดับ(จาก 40.8, 36.3, 2.51 และ 1.99 เป็น 58.9, 40.1, 6.38 และ 12.4 ตามลำดับ)

4.2 ศึกษาผลการผลิตเยื่อเคมีแบบโมโนซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่า

การต้มเยื่อฟางข้าวด้วยกระบวนการโมโนซัลไฟท์ โดยใช้ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 9 และ 3 ของน้ำหนักฟางข้าวเก่าอบแห้ง ตามลำดับ ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้เป็นบัฟเฟอร์ (buffer agent) ในการต้มเยื่อฟางข้าวด้วยโซเดียมซัลไฟท์ โดยปริมาณที่ใช้นี้เป็นไปตามสภาวะการผลิตเยื่อของบริษัทฯ มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ

สมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า	
ผลผลิตเยื่อ (accepted yield), ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	34.7
กากเยื่อ (reject yield), ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	1.1
ความขาวสว่าง (brightness), ร้อยละ	13.9
ค่า KAPPA NUMBER, หน่วย	26.8
ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันของฟางข้าวอบแห้ง	90
ปริมาณของโซเดียมซัลไฟที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันเยื่อ	259
ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันของฟางข้าวอบแห้ง	30
ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันเยื่อ	86.5

ผลการทดลองพบว่า การผลิตเยื่อตามสภาวะที่กำหนดของโรงงาน ให้ผลผลิตเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าเท่ากับร้อยละ 34.7 มีค่า KAPPA NUMBER เท่ากับ 26.8 ค่าความขาวสว่างร้อยละ 13.9 และในการผลิตเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวไม่ฟอก (unbleached pulp) จำนวน 1 ตัน จะต้องใช้โซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 259 และ 86.5 กิโลกรัม ตามลำดับ

นำเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าที่ได้จากการกระบวนการผลิตเยื่อ มาทำแผ่นทดสอบมาตรฐานเพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกลของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า ณ จุดเริ่มต้นของการบดเยื่อ (initial point) ซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีการบดเยื่อ (จำนวนรอบของการบดเท่ากับ 0 rev.) พบว่าไม่สามารถทดสอบสมบัติต่างๆ ได้เนื่องจากแผ่นทดสอบมีลักษณะฉีกขาดได้ง่าย ไม่สามารถลอกออกเป็นแผ่นทดสอบมาตรฐานที่สมบูรณ์ได้ และได้ทำการทดสอบ - ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ (freeness), มิลลิลิตร (mL.CSF) = 160

- ค่าการแยกน้ำออกจากแผ่นกระดาษเปียก (drainage time), วินาที = 34.4

ข้อมูลที่ได้รับจากบริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ได้แสดงสมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวที่ยังไม่ผ่านการฟอก (unbleached pulp) ซึ่งเป็นสภาวะการผลิตเยื่อตามปกติของโรงงาน (ใช้ฟางข้าวที่ผ่านการเก็บเกี่ยวไม่นานยังมีสภาพใหม่) และใช้ปริมาณสารเคมีในการต้มเยื่อตามสภาวะการผลิต ณ ที่โรงงาน (เพื่อใช้เปรียบเทียบกับเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าไม่ฟอกที่ผลิตในห้องปฏิบัติการของกลุ่มเยื่อกระดาษ) พบว่ามี ผลผลิตเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเท่ากับร้อยละ 47.5 มีค่า KAPPA NUMBER เท่ากับ 14.7 ค่าความขาวสว่างร้อยละ 43.0 และในการผลิตเยื่อฟางข้าว 1 ตัน จะต้องใช้โซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 189 และ 63.2 กิโลกรัม ตามลำดับ

4.3 การวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใย (fiber dimension measurement) ของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่

ผลการวัดขนาดเส้นใยของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงผลการวัดขนาดของเส้นใย (Dimension of fiber)

ขนาดของเส้นใย	ฟางข้าวเก่า	ฟางข้าวใหม่
ความยาว, มิลลิเมตร	0.7	1.2
ความกว้าง ไมโครเมตร,	6	9
อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง	117	133

เส้นใยของเยื่อฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่มีความยาวและความกว้างของเส้นใยเท่ากับ 0.7, 1.2 และ 6, 9 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบเส้นใย (fiber), vessel element, parenchyma และ leaf epidermis ของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่ แสดงดังภาพที่ 1-7 และ 8-14[ภาคผนวก ง (หน้า 36-42)] ตามลำดับ ซึ่งในส่วนของฟางข้าวเก่าจะพบส่วนละเอียดปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก

บทที่ 5

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

5.1 ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่

ในการศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวเก่ากับฟางข้าวใหม่ พบว่า

5.1.1 ปริมาณเถ้า ฟางข้าวเก่ามีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟางข้าวใหม่เท่ากับ 4.6 เท่า (จาก 51.1 เป็น 11.0) แสดงให้เห็นว่าส่วนที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 51.1 ของน้ำหนักฟางข้าวเก่าอบแห้ง ปริมาณเถ้าของฟางข้าวเก่าบ่งชี้ถึงซิลิก้าที่มีปริมาณสูงมากและจะส่งผลกระทบต่อเครื่องจักรในกระบวนการผลิต ทำให้เกิดการสึกหรอถ้าหากมีการนำเยื่อจากฟางข้าวเก่าไปผลิตเป็นแผ่นกระดาษ

5.1.2 การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 พบว่าฟางข้าวเก่ามีปริมาณสูงถึงร้อยละ 72.7 เมื่อเทียบกับฟางข้าวใหม่ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 51.5 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง จากค่านี้แสดงให้เห็นว่า ทั้งฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่ จะมีการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็วเมื่อทิ้งไว้ตามธรรมชาติ ดังนั้นการที่จะเก็บรักษาฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่เป็นระยะเวลานาน ก็จะเกิดการเสื่อมสลายตัวเพิ่มสูงขึ้น

5.1.3 ปริมาณแอลฟ่า-เซลลูโลส ฟางข้าวเก่ามีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับฟางข้าวใหม่เท่ากับร้อยละ 9.5 (จาก 40.1 เป็น 36.3) ปริมาณที่ลดลงดังกล่าวทำให้การผลิตเยื่อกระดาษจากตัวอย่างฟางข้าวเก่า จะได้เยื่อกระดาษที่มีผลผลิตเยื่อลดลง

- ทั้งปริมาณเถ้าและการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ที่มีปริมาณสูง รวมทั้งปริมาณของโฮโลเซลลูโลสและแอลฟ่าเซลลูโลส ที่มีปริมาณต่ำ จึงจัดเป็นข้อด้อยอย่างมากของฟางข้าวเก่า ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตเป็นเยื่อกระดาษ เมื่อเทียบกับฟางข้าวใหม่และไม้ชนิดอื่นๆ ซึ่งมีข้อมูลแสดงตามตารางที่ 4 และในวารสารปริทัศน์ (หน้า 5)

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้ (chemical compositions of wood)

องค์ประกอบทางเคมี, ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	ฟางข้าว	
	เก่า	ใหม่
ปริมาณเถ้า (ash content)	51.1	11.0
การละลายในแอลกฮอล์-เบนซีน (alcohol-benzene solubility)	2.90	7.65
การละลายในน้ำร้อน (hot water solubility)	23.6	10.7
การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 (1% NaOH solubility)	72.7	51.5
ปริมาณลิกนิน (lignin content)	4.91	12.8
ปริมาณเพนโตแซน (pentosan)	2.0	13.5
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส (holocellulose)	40.8	58.9
แอลฟ่าเซลลูโลส (alpha cellulose)	36.3	40.1
เบต้าเซลลูโลส (beta cellulose)	2.5	6.4

■ ถ้าหากต้องการที่จะเก็บรักษาฟางข้าวเก่าไว้ตามสภาพการจัดเก็บในโรงงาน จะพบการเสื่อมสลายของฟางข้าวเก่าเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อนำมาใช้ผลิตเป็นเยื่อกระดาษ จะให้ผลผลิตและคุณภาพด้านความเหนียวของเยื่อต่ำ ภาพที่ 15-17[ภาคผนวก ง (หน้า 43-44)]แสดงกราฟ ปริมาณเถ้า การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอก ไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 และปริมาณแอลฟ่า-เซลลูโลส ของฟางข้าวเก่า ฟางข้าวใหม่ และไม้ชนิดอื่นๆ[ข้อมูลจากวารสารปริทัศน์ (หน้า 5)]

5.2 ศึกษาผลการผลิตเยื่อเคมีแบบซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่า

การทดลองต้มเยื่อฟางข้าวเก่าในห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการเคมีแบบซัลไฟท์ โดยใช้ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 9 และ 3 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า

- ผลผลิตเยื่อ เยื่อฟางข้าวเก่าที่ผลิตในห้องปฏิบัติการมีผลผลิตเยื่อร้อยละ 34.7 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง ซึ่งจะพบว่ามีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อในโรงงานซึ่งใช้ฟางข้าวใหม่มีค่าผลผลิตเยื่อร้อยละ 47.5 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง จะเห็นว่าผลผลิตเยื่อลดลงคิดเป็นร้อยละ 26.9 การที่ผลผลิตเยื่อจากฟางข้าวเก่าลดลงเมื่อเทียบกับผลิตเยื่อจากฟางข้าวใหม่แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียผลผลิตเยื่อที่ใช้ในการผลิตกระดาษจากฟางข้าวเก่า

- ค่า KAPPA NUMBER ของเยื่อจากฟางข้าวเก่ามีค่าสูงกว่าเยื่อจากฟางข้าวใหม่เท่ากับ 12.1 หน่วย (26.8-14.7) ปริมาณที่สูงขึ้นเกิดจากการคิดเทียบไปที่ฟางข้าวเริ่มต้นที่มีการเสื่อมสลาย และค่าความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าวเก่าต่ำกว่าเยื่อฟางข้าวใหม่เท่ากับ 29.1 หน่วย (43.0-13.9) แสดงให้เห็นว่าสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อการลดค่า KAPPA NUMBER และการเพิ่มค่าความขาวสว่างเพียงเล็กน้อย เนื่องจากส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปกับการทำปฏิกิริยากับส่วนที่เกิดการเสื่อมสลายของฟางข้าวเก่า

- ความสิ้นเปลืองสารเคมี การผลิตเยื่อซัลไฟท์จากฟางข้าวเก่าในห้องปฏิบัติการที่ได้รับจากบริษัทฯ มีความสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อฟางข้าวไม่ฟอกจำนวน 1 ตัน จะต้องใช้โซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 259 และ 86.5 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งในการผลิตเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ในโรงงานมีความสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อฟางข้าวไม่ฟอกจำนวน 1 ตัน จะใช้โซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 189 และ 63.2 กิโลกรัม ตามลำดับ

แสดงให้เห็นว่าถ้าโรงงานนำฟางข้าวเก่า ไปใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ จะต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีสูงขึ้นมาก คือจะสิ้นเปลืองโซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นอีกร้อยละ 37.0 และ 36.9 ตามลำดับ

- ในการทำแผ่นทดสอบมาตรฐานเพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกลของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า พบว่าแผ่นทดสอบที่ได้มีลักษณะฉีกขาดได้ง่าย ไม่สามารถลอกออกเป็นแผ่นทดสอบมาตรฐานที่สมบูรณ์ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถทดสอบสมบัติทางเชิงกลได้ และในการทดสอบค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ ณ จุดเริ่มต้นของการบดเยื่อ (จำนวนรอบของการบดเท่ากับ 0 รอบ) มีค่าเท่ากับ 160 มิลลิลิตร (mL.CSF) และเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก เท่ากับ 34.4 วินาที จึงนับได้ว่าเป็นข้อที่ยุ่งยากมากในการนำเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อมาทำแผ่นกระดาษ เมื่อเปรียบเทียบค่าการอุ้มน้ำของเยื่อและเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก กับเยื่อที่ผลิตในโรงงานและวัสดุที่เป็นเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ แสดงตามตารางที่ 5 และภาพที่ 18-19 ภาคผนวก ว (หน้า 44-45)

- ข้อมูลของโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ (กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัยเดิม) ปี พ.ศ.2534 เยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ที่ได้รับจากโรงงานเป็นเยื่อที่ยังไม่ผ่านการฟอก (unbleached pulp) ซึ่งใช้ฟางข้าวใหม่เป็นวัสดุในการผลิต เมื่อนำมาทำเป็นแผ่นทดสอบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม (กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัยเดิม) ทำการบดเยื่อ ณ จุดเริ่มต้นของการบดเยื่อ (จำนวนรอบของการบดเท่ากับ 0 รอบ) พบว่าเยื่อมีค่าการอุ้มน้ำของเยื่อเท่ากับ 280 มิลลิลิตร(mL.CSF) และมีค่าการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียกเท่ากับ 4.9 วินาที

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าฟรีเนสของเยื่อและเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก ของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่

สมบัติของเยื่อ	ฟางข้าวเก่า	ฟางข้าวใหม่
จำนวนรอบของการบด, รอบ	0 (initial)	
ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ, มิลลิลิตร (mL.CSF)	160	280
เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก (drainage time), วินาที	34.4	4.9

ที่มา : กลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ผลจากการทดลองผลิตเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า นำมาทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน ณ จุดเริ่มต้นของการบดเยื่อ (จำนวนรอบของการบดเท่ากับ 0 รอบ)

1. ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ (freeness) ของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อฟางข้าวใหม่ และเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ ซึ่งจะมีค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ มากกว่า 500 มิลลิลิตร (mL.CSF) ขึ้นไป แสดงว่าเยื่อฟางข้าวเก่ามีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงมาก ซึ่งนับเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับการผลิตกระดาษ เพราะในการแยกน้ำออกจากแผ่นกระดาษจะทำได้ค่อนข้างยากและต้องใช้เวลานานขึ้น

2. เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก ของเยื่อฟางข้าวเก่ามีค่าเท่ากับ 34.4 วินาที ซึ่งมีค่าสูงมาก ดังนั้นถ้านำเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า ไปผลิตเป็นแผ่นกระดาษ โดยเครื่องจักรเดินแผ่นกระดาษในขั้นการทำแผ่นกระดาษ จะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนมากขึ้น เนื่องจากการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียกต้องใช้เวลามากขึ้น ซึ่งอาจต้องเพิ่มความยาวของเครื่องจักรเดินแผ่นกระดาษ อันเป็นการไม่คุ้มค่าต่อการที่จะนำฟางข้าวเก่ามาใช้ในการเดินแผ่นกระดาษ

5.3 การวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใย ของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่

การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่ ผลจากการทำสไลด์แล้วถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบว่าทั้งในส่วนของเส้นใย (fiber), vessel element, parenchyma และ leaf epidermis จะพบว่าเยื่อฟางข้าวเก่ามีส่วนละเอียดปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากเสื่อมสลายตัวตามธรรมชาติ เส้นใยมีสภาพไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของ vessel element ที่มีลักษณะถูกทำลายภายหลังจากผ่านกระบวนการผลิตเยื่อ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟางข้าวเก่ามีการเสื่อมสลายตัวตามธรรมชาติเมื่อนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อจะพบการถูกทำลายขององค์ประกอบต่างๆ มากขึ้น เช่น เส้นใย และ vessel element เป็นต้น

สรุปผลการทดลอง

- **จากข้อมูลด้านการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี** การผลิตเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่าและการวัดขนาดและถ่ายภาพเส้นใยของเยื่อจากฟางข้าวเก่าและฟางข้าวใหม่ เมื่อนำผลต่างๆ มาพิจารณาพร้อมกัน เช่น การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ที่มีปริมาณสูงมาก ผลผลิตเยื่อที่ต่ำ ความสิ้นเปลืองสารเคมีเพื่อใช้ในการผลิตเยื่อฟางข้าวมีค่าสูง การที่ไม่สามารถทำแผ่นทดสอบมาตรฐานที่มีสภาพสมบูรณ์ได้ (แผ่นทดสอบมาตรฐานมีการฉีกขาดและกรอบแตก) ดังนั้นจะสามารถประเมินการใช้ประโยชน์จากฟางข้าวเก่าที่ได้รับจากโรงงาน ถ้าจะนำไปใช้ประโยชน์ในแง่ของการผลิตเยื่อและกระดาษ จะให้ผลผลิตเยื่อต่ำ มีความสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในปริมาณสูง และแผ่นกระดาษที่ได้มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ รวมถึงถ้ามีการนำฟางข้าวเก่า มาใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตเยื่อกระดาษในโรงงานก็จะต้องใช้พลังงานในการเดินแผ่นกระดาษเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากเยื่อมีค่าการอุ้มน้ำของเยื่อต่ำมากและมีค่าการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียกที่สูงมาก

- ตัวอย่างฟางข้าวของบริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ไม่มีความเหมาะสมในการที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษ ที่มีคุณภาพด้านความเหนียวตามจุดประสงค์ของการผลิตเยื่อ

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ (ผู้อำนวยการสำนักเทคโนโลยีชุมชน) และคุณธิดา เกิดกำไร (ผู้อำนวยการโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม) กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความรู้ด้านการผลิตเยื่อและกระดาษจากฟางข้าว รวมทั้งการตรวจ แก้ไข งานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. สมชาติ รุ่งอินทร์ และรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ "การศึกษาหญ้าขจรจบและฟางข้าว คุณสมบัติในการทำเยื่อและกระดาษ" งานเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย (กลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม) กรม วิทยาศาสตร์บริการ 15 ก.ค. 2522
2. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ "การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อผสมฟางและหญ้าแบบสามขั้น" งานเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย (กลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม) กรมวิทยาศาสตร์บริการ ธ.ค. 2524
3. ดวงใจ วิบูลย์ธนภัณฑ์ "การศึกษาความเร็วของปฏิกริยาการต้มเยื่อฟางข้าวโดยกระบวนการโซดา" งานเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย (กลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม) กรมวิทยาศาสตร์บริการ ม.ค. 2525
4. สมชาติ รุ่งอินทร์ "ฟรีเนส : ข้อวิจารณ์ทางทฤษฎีและการใช้งาน" งานเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย (กลุ่มเยื่อและกระดาษ โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม) กรมวิทยาศาสตร์บริการ ม.ค. 2525
5. SVEN A.RYDHOLM, "Pulping Process". 1965 Imterscience Publishers a division of John Wiley & Sons, Inc. New York-London-Sydney

ภาคผนวก ก.

คำร้องบริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด

กอ.
11. พ.ค.2544
-31-

กองการวิจัย เลขที่ 6329
วันที่ 11 พ.ค 2544 เวลา 1425 น.

บริษัท โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด

โรงงาน : เลขที่ 48 ตำบลบางกระสั้น อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13160
☎ (035) 261066, 261430 Fax : (035) 261433

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
เลขรับที่ 1858
วันที่ 11. พ.ค.2544 เวลา 13.02 น.

10 พฤษภาคม 2544

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
เลขรับที่ 6329
วันที่ 17. ต.ค.2544 เวลา 9.00 น.
หมายเลขปฏิบัติการที่ VO. 157

เลขที่ ปอ. (03)/024/2544

เรื่อง ขอใช้บริการต้มเยื่อฟางข้าว

เรียน อธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ

ด้วยบริษัท โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ได้มีฟางข้าวค้างเก็บไว้หลายปีอยู่จำนวนหนึ่ง ได้พิจารณาจะนำฟางข้าวเก่านี้มาใช้เป็นประโยชน์ แต่อุปกรณ์การทดลองต้มเยื่อฟางของบริษัทขัดข้อง จึงขอความกรุณาใช้บริการการต้มเยื่อฟางของกลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 ในการทดลองต้มเยื่อฟางและทำการประเมินคุณภาพ โดยค่าใช้จ่ายในการทดลองครั้งนี้ ทางบริษัทจะเป็นผู้รับผิดชอบ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา และบริษัทฯ ขอขอบพระคุณต่อความกรุณาของท่านมา ณ โอกาสนี้

(นายประยุทธ จันทราทิตย์)
รักษาการรองผู้อำนวยการ

ได้รับเงินค่าธรรมเนียมการวิเคราะห์ 1 ตัวอย่าง
ตัวอย่างละ 10,000 บาท รวมเป็นเงิน 10,000 บาท
ใบเสร็จเล่มที่ 83/45 เลขที่ 30
ผู้รับเงิน
วันที่ 15 ต.ค. 2544

2 pages
11. พ.ค.2544

ได้รับโอนเรียบร้อยแล้ว

ภาคผนวก ข.

วิธีวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี

- ปริมาณเถ้า (ash content) ตามมาตรฐาน TAPPI T 211
- การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน ตามมาตรฐาน TAPPI T 204
- การละลายในน้ำร้อน ตามมาตรฐาน TAPPI T 207
- การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ตามมาตรฐาน TAPPI T 212
- ปริมาณลิกนิน ตามมาตรฐาน TAPPI T 222
- ปริมาณเพนโตแซน ตามมาตรฐาน TAPPI T 223
- ปริมาณโฮโลเซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI section, January 10, 1946
- แอลฟ่า-เซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI T 203
- เบต้า-เซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI T 203
- แกมม่า-เซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI T 203
- ลิกนินในเยื่อ ตามมาตรฐาน TAPPI T 236

ภาคผนวก ค.

คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์-ทดสอบ

accepts	เยื่อดีที่คัดผ่านตะแกรงหรือเซนตริคลีนเนอร์
air-dry weight	น้ำหนักวัสดุแห้งเป็นน้ำหนักที่ได้เมื่อวางผึ่งเป็นเวลานานพอสมควรในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิปกติ สำหรับเยื่อกระดาษจะมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10
KAPPA NUMBER	เป็นดัชนีบ่งชี้ปริมาณลิกนินที่เหลือในเยื่อหมายถึง จำนวนกรัมของคลอรีนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเยื่อแห้งจำนวน 100 กรัม ในสภาวะที่กำหนดตามมาตรฐาน hypo number มีสหสัมพันธ์ที่ดีกับ klason lignin เฉพาะในช่วงที่ผลิตเยื่อต่ำกว่าร้อยละ 70 เท่านั้น
lignin	เป็น polymer อสัณฐานประกอบด้วย phenyl propane unit เฉลี่ยประมาณ 2500 หน่วย จับตัวกันเป็นโครงร่างข่ายสามมิติด้วย ether bond (ส่วนใหญ่เป็น phenyl-o-aryl bond) และ C-C bond ลิกนินมีความเข้มข้นสูงที่สุดในส่วนเชื่อมต่อระหว่างเส้นใย (middle lamella) ทำหน้าที่การยึดเส้นใยให้ติดอยู่ด้วยกัน ลิกนินมีคุณสมบัติเป็น thermoplastic อุณหภูมิที่อ่อนตัว (120-2000C) ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น
oven-dry weight	น้ำหนักวัสดุอบแห้ง หมายถึง น้ำหนักเมื่ออบที่อุณหภูมิ 105 C จนกระทั่งน้ำหนักวัสดุไม่ลดลงอีก ในทางปฏิบัติถือว่าหากชั่งครั้งต่อไปน้ำหนักลดลงน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักชั่งครั้งก่อนก็ใช้ได้
pulp yield, %	ผลผลิตเยื่อที่ได้จากการต้ม คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักวัสดุ
beater	เครื่องบดเยื่อ เป็นคำที่ใช้เรียกเครื่องบดเยื่อมาแต่เดิมเช่น hollander beater ปัจจุบันเราเรียกเครื่องบดเยื่อแบบกรวย (conical) หรือจาน (disk) ว่า refiner ส่วนคำว่า beater หมายถึงเครื่องบดในประเภทเดียวกับ hollander beater beater ที่ใช้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในห้องปฏิบัติการคือ valley beater เครื่องบดเยื่อชนิดอื่นในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ PFI mill เป็นต้น
brightness	ความขาวสว่าง หมายถึง reflectivity ของแผ่นเยื่อหรือกระดาษวัดที่ช่วงคลื่นแสง 457 nm. เปรียบเทียบกับ MgO (ISO 2469-1977 (E) ใช้ perfect reflecting diffuser) โดยถือว่า MgO มี reflectivity เป็น 100 % ความขาวสว่างเป็นคุณสมบัติทางกายภาพโดยแท้ ไม่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะเกี่ยวกับสีได้ ค่าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับการกระจาย (light scattering) และการดูดซับแสง (light absorption) ของเยื่อเท่านั้น ฉะนั้นความขาวสว่างจึงเป็นค่าที่มีประโยชน์อย่างยิ่งแต่เฉพาะในการระบุคุณสมบัติของเยื่อฟอก หรืออีกนัยหนึ่ง

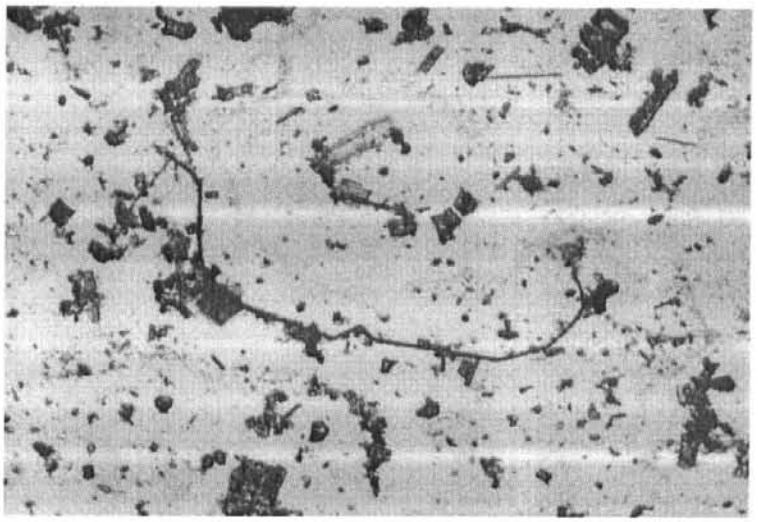
	การวัดผลการฟอกเยื่อเท่านั้นแต่ยังไม่เพียงพอต่อการบ่งบอกความขาว (whiteness) ของกระดาษ การวัดความขาวสว่างขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีหลายแบบแตกต่างกันในด้าน optical geometry เป็นสำคัญ อุปกรณ์วัดความขาวสว่างที่รู้จักกันดีได้แก่ Elerpho, G.E. และ photovolt ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือเหล่านี้แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ไม่สามารถระบุให้ถูกต้องแน่ชัดเป็นเกณฑ์ได้ว่ามากน้อยเพียงใด
brightness reversion	การเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อ ได้แก่ การที่เยื่อมีความขาวสว่างลดลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานการเสื่อมสภาพความขาวเกิดจากปัจจัยทางเคมีในตัวเยื่อเองและปัจจัยทางกายภาพจากภายนอก เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และความร้อน
consistency, percent	ความข้นของน้ำเยื่อคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้งในน้ำเยื่อ consistency, % $= \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง+น้ำหนักน้ำ}}$ เนื่องจากน้ำเยื่อ หรือ pulp slurry มิได้เป็นสารละลายแท้จริง (true solution) จึงควรเรียก consistency ว่า ความข้น แทนคำว่า เข้มข้น ซึ่งหมายถึง concentration ของ true solution ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเราแบ่งความเข้มข้นเป็น 3 ระดับ คือ low consistency (0-6 %) medium consistency (6-20 %) และ high consistency (20-40 %)
basis weight	น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่มาตรฐาน มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร เรียกกันว่า กรัมกระดาษ แต่ปัจจุบัน ISO และ TAPPI ใช้คำว่า grammage แทน basis weight โดยทั่วไปหมายถึงน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ที่เก็บรักษาในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ควบคุมมาตรฐานการทดสอบ สำหรับน้ำหนักมาตรฐานที่กำหนดย่อมให้ค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อน ได้ร้อยละ 5 ถ้าเป็นกระดาษแข็งมีน้ำหนักมากๆ อาจลดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเหลือเพียงร้อยละ 3
caliper	ความหนาของกระดาษวัดตามสภาวะที่กำหนด โดยใช้ไมโครมิเตอร์ปัจจัยสำคัญในการทดสอบ คือ ความกดดันที่ใช้ในการวัด ISO และ Scan test ใช้ความกดดัน 100 kPa แต่ใน TAPPI standard ใช้ความกดดันเพียง 50 kPa ความแตกต่างเนื่องจากอุปกรณ์ในกรณีที่กระดาษมีความหนาแน่นต่ำจึงอาจเกิดได้มาก วิธีวัดความหนาที่ให้ค่าถูกต้องกว่าคือวิธี integrated mean effective thickness และ mercury pycnometric
moisture content, %	ปริมาณความชื้นในกระดาษ หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีในกระดาษคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักกระดาษในขณะนั้น เช่น น้ำหนักเมื่อได้รับตัวอย่างหรือน้ำหนักภายหลังการเก็บในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ

freeness test	ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อ เป็นการทดสอบคุณสมบัติในการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อดังกล่าวแล้ว ในเรื่อง drainability freeness test ที่แพร่หลายที่สุดคือ Canadian standard Freeness ซึ่งเดิมมีจุดประสงค์เพื่อการควบคุมการบดเยื่อไม้บดเท่านั้น แต่ในปัจจุบันใช้แพร่หลายมากที่สุด แม้ว่าการประยุกต์ใช้งานจริงๆ จะมีข้อจำกัดมากก็ตาม การรายงานผลเป็นค่ามิลลิลิตร
drainage time	เป็นเวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก อันเป็นการทดสอบคุณสมบัติในการให้น้ำไหลผ่านออกจากเยื่อ โดยใช้เครื่องทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน แบบ british standard รายงานผลเป็นวินาทีที่น้ำไหลผ่านจากเยื่อจนหมด การทดสอบนี้มีประโยชน์ต่อการคาดคะเน การแยกน้ำของเยื่อบนเครื่องเดินแผ่น ซึ่งดีกว่าการทดสอบ freeness หรือ sloweness
drainability	คุณสมบัติของเยื่อในการให้น้ำไหลผ่านไปได้ช้าหรือเร็วเพียงใด คุณสมบัตินี้มีความสำคัญในขั้นตอนในการผลิตต่างๆ ทั้งในการทำเยื่อและกระดาษ เช่น การล้างเยื่อ การทำให้เยื่อข้น การเดินแผ่น เป็นต้น การวัดค่า drainage resistance ของเยื่อโดยตรงกระทำได้ยากและในบางกรณีอาจต่างจากสภาวะที่เป็นจริง (เช่นการเดินแผ่นกระดาษในโรงงาน) ปัจจุบันการทดสอบ drainage ของเยื่อที่นิยมกันคือ การทดสอบ freeness หรือ sloweness และ drainage time

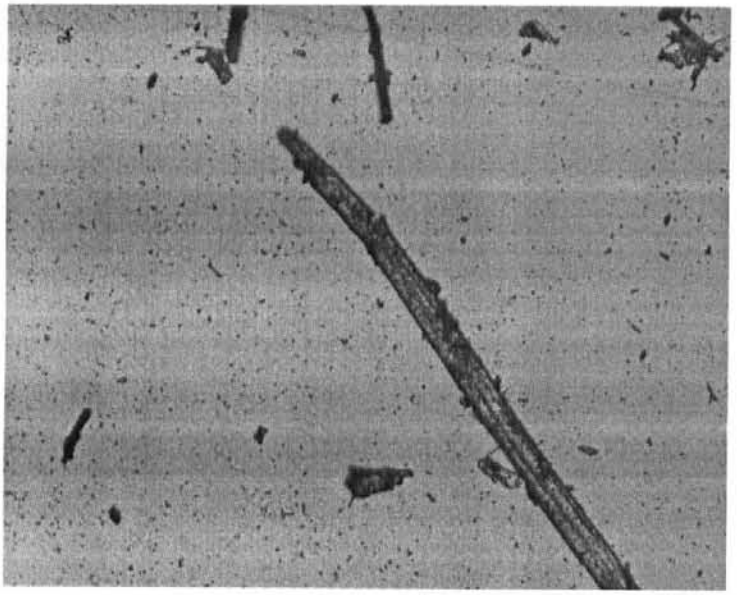
ภาคผนวก ง.

ภาพเส้นใย (fiber), vessel element, parenchyma และ leaf epidermis ของเยื่อฟางข้าวเก่าและเยื่อฟางข้าวใหม่

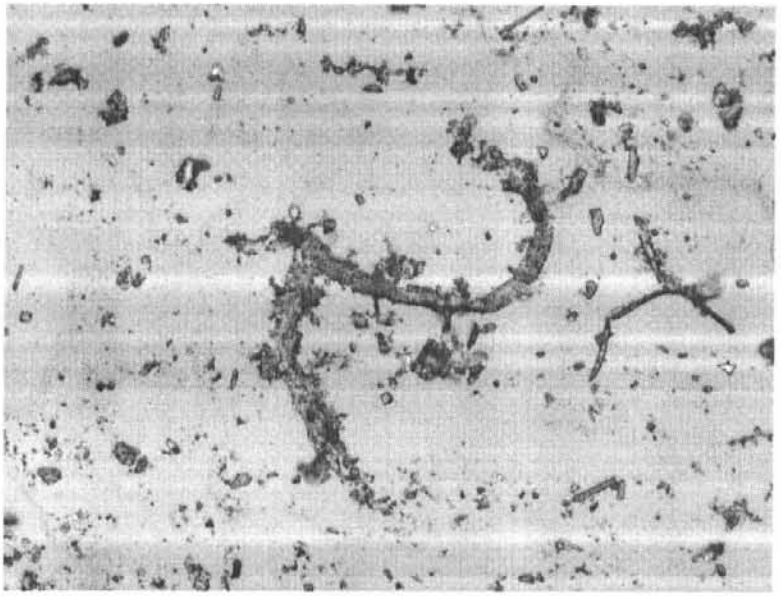
แสดงดังภาพที่ 1-7 และ 8-14 ตามลำดับ แสดงเส้นใย (fiber), vessel element, parenchyma และ leaf epidermis



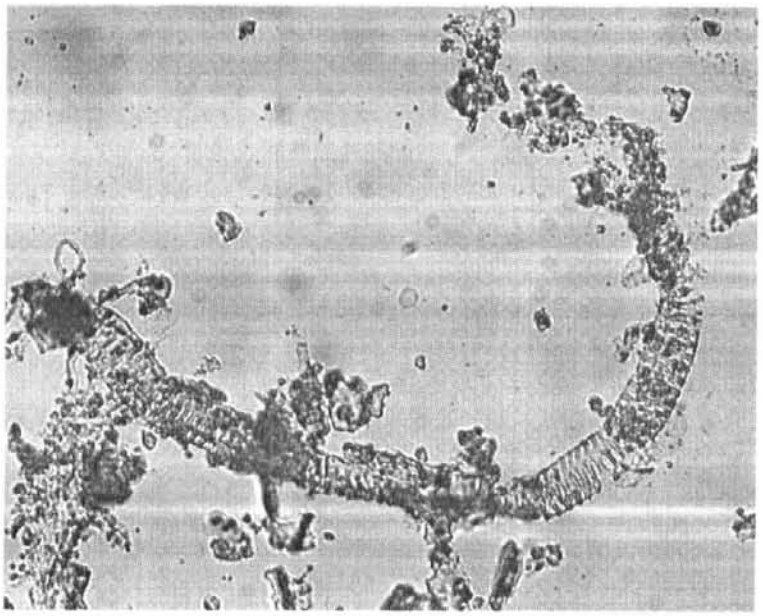
ภาพที่ 1 แสดงเส้นใยจากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 10x)



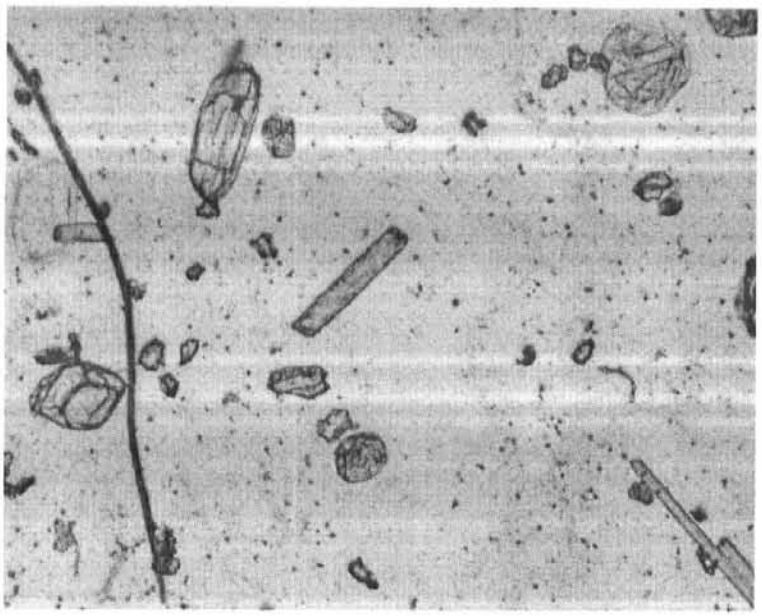
ภาพที่ 2 แสดงเส้นใยจากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)



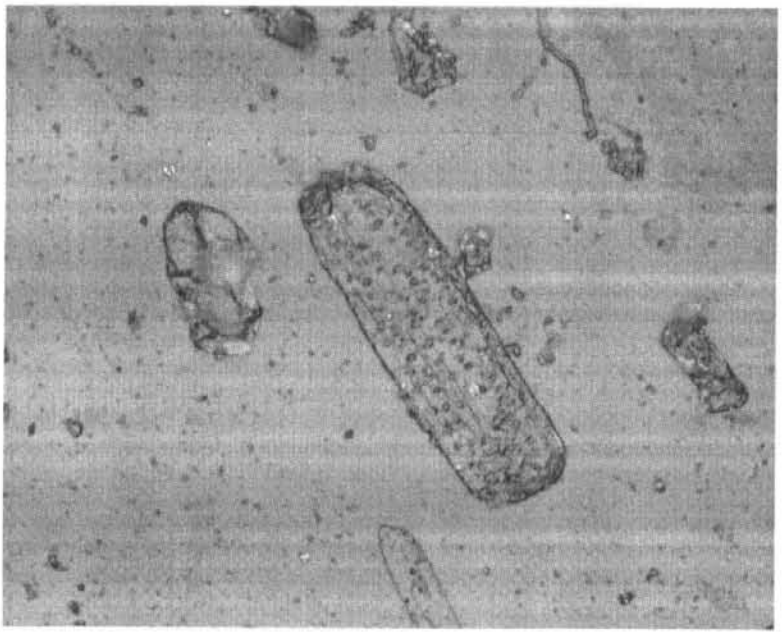
ภาพที่ 3 แสดง vessel element จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)



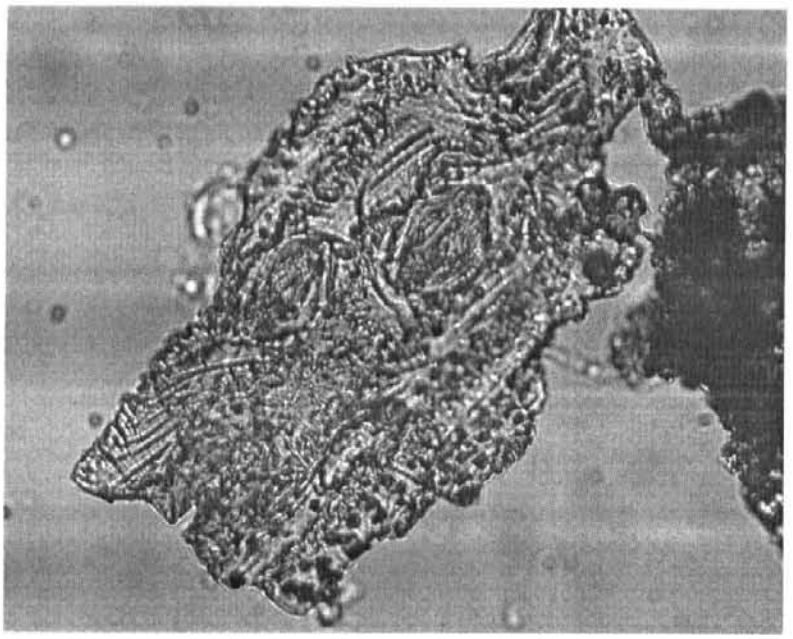
ภาพที่ 4 แสดง vessel element จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 50x)



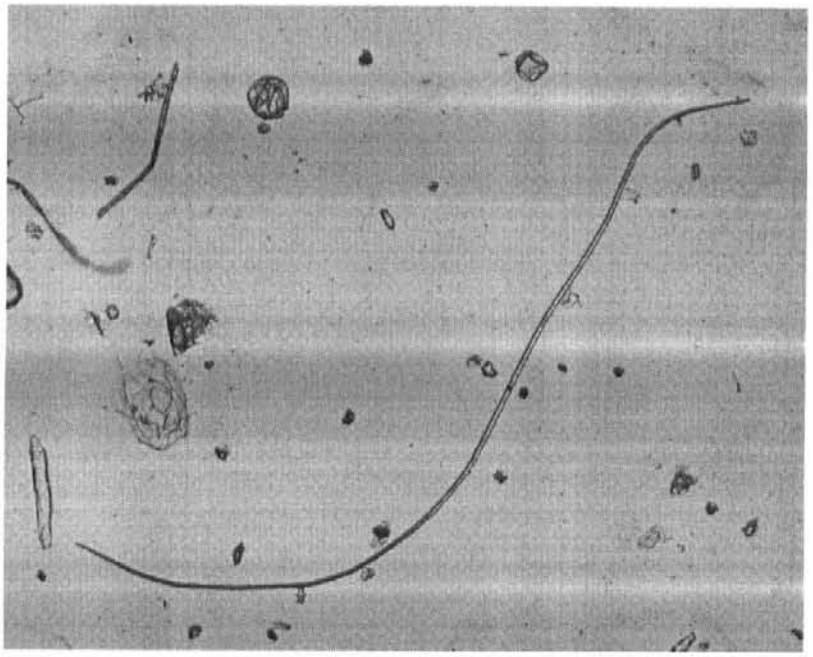
ภาพที่ 5 แสดง parenchyma จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)



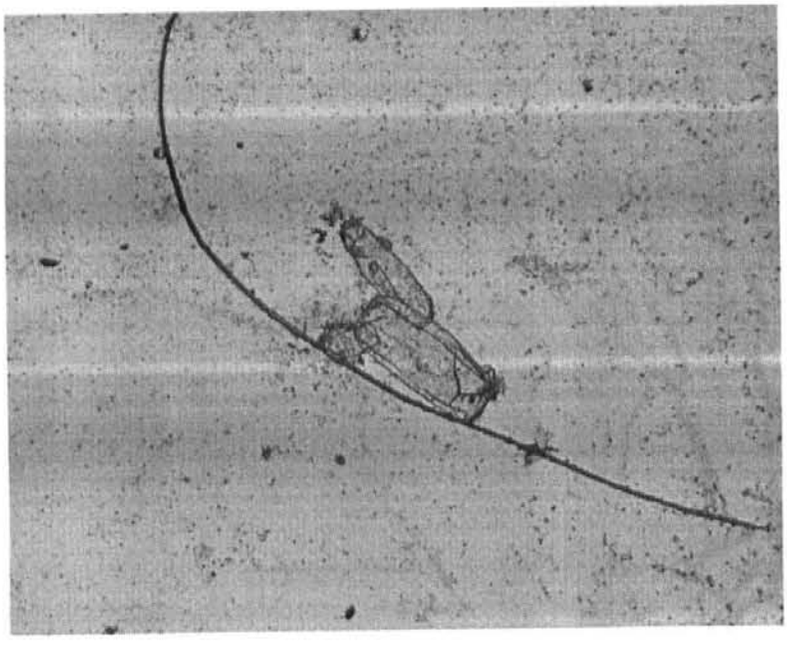
ภาพที่ 6 แสดง parenchyma จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 50x)



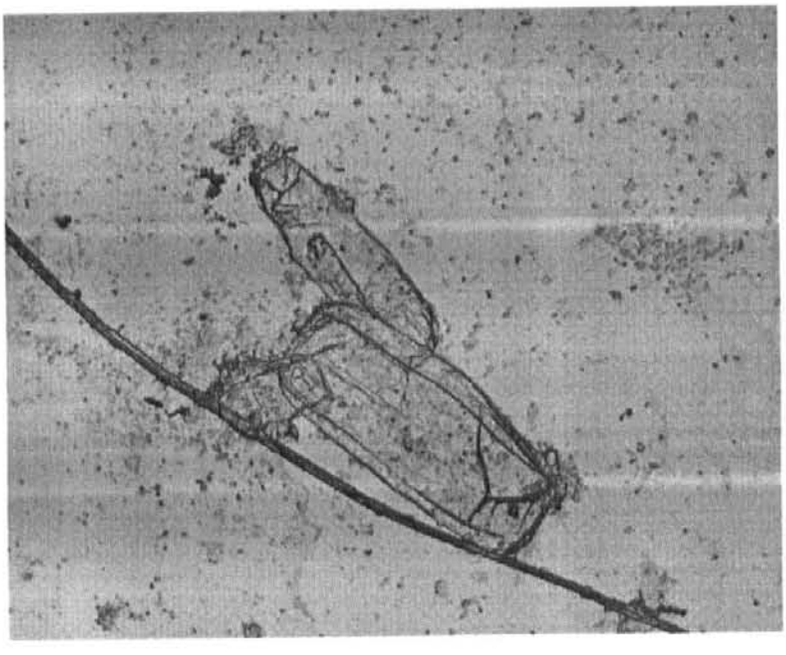
ภาพที่ 7 แสดง leaf epidermis จากเยื่อฟางข้าวเก่า (กำลังขยาย 20x)



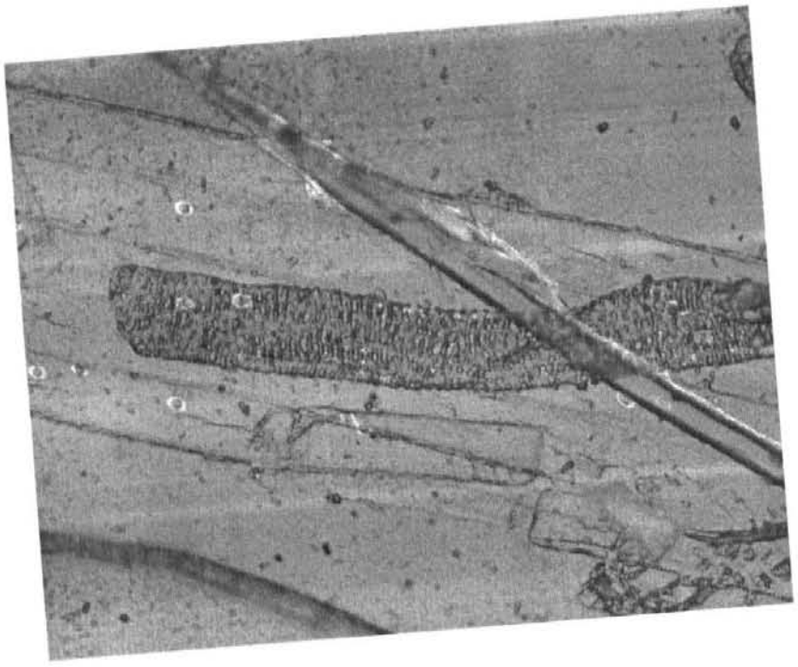
ภาพที่ 8 แสดงเส้นใยจากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 10x)



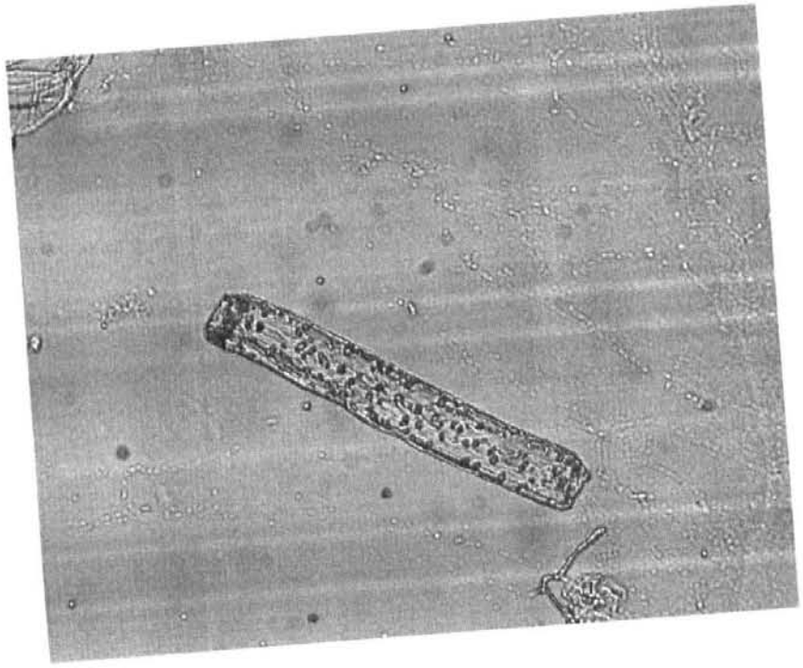
ภาพที่ 9 แสดงเส้นใย และ parenchyma จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 10x)



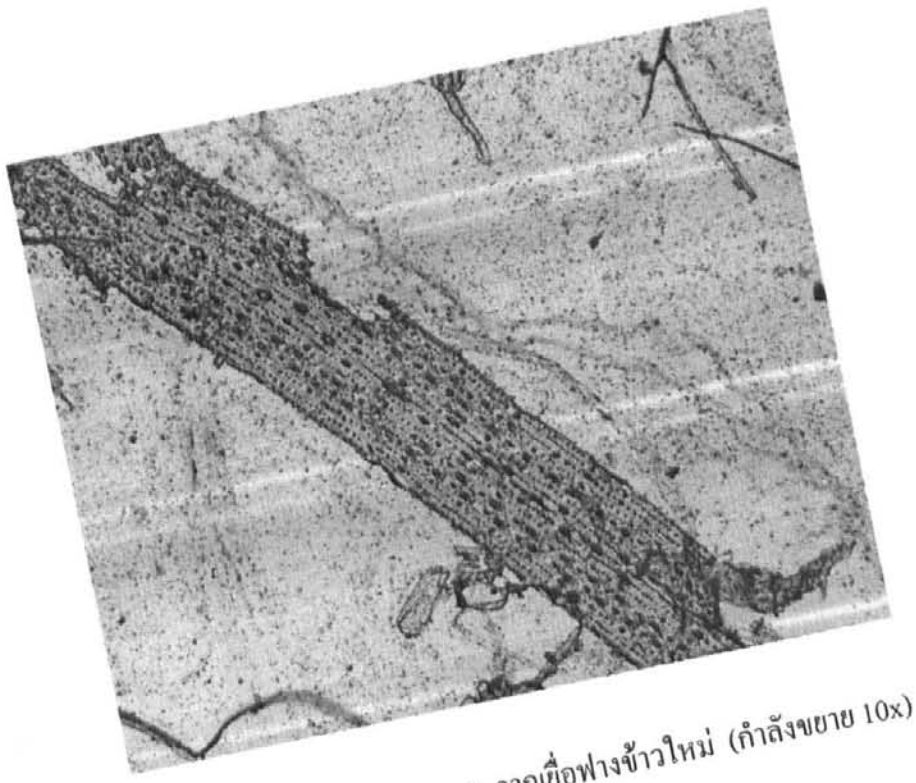
ภาพที่ 10 แสดงเส้นใย และ parenchyma จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 20x)



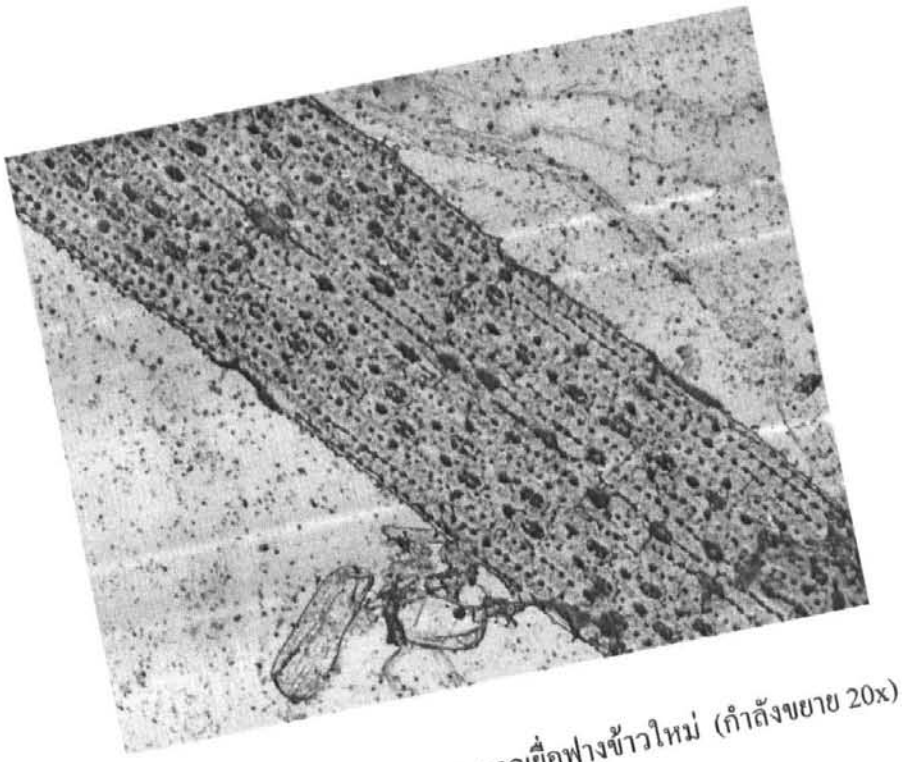
ภาพที่ 11 แสดง vessel element จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 50x)



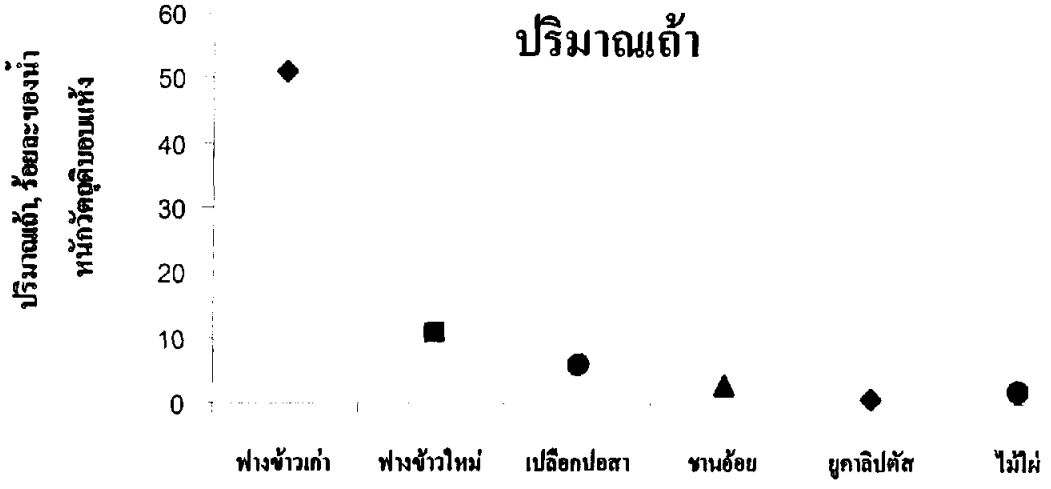
ภาพที่ 12 แสดง parenchyma จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 50x)



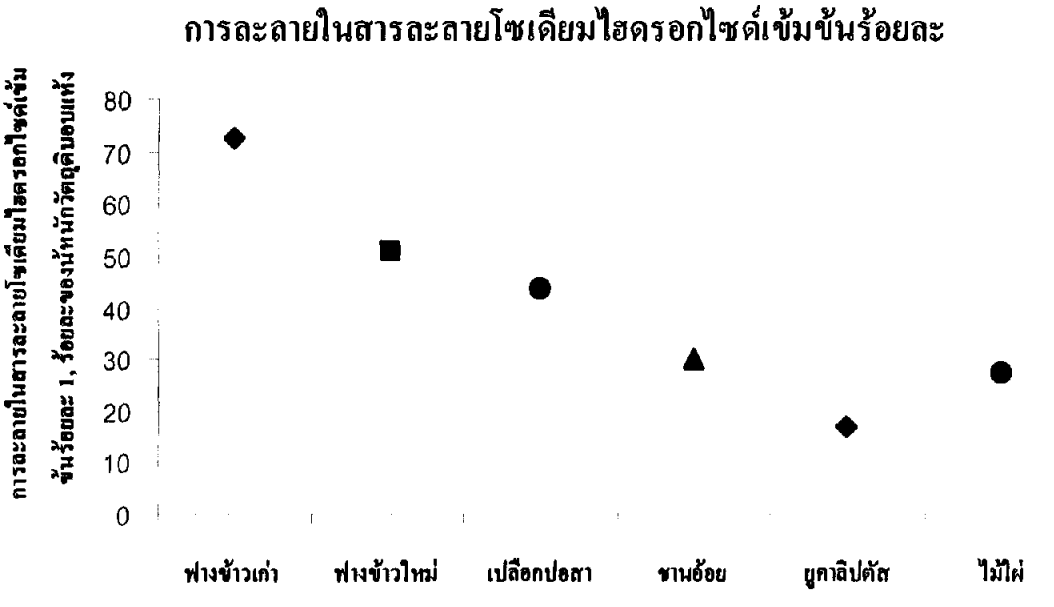
ภาพที่ 13 แสดง leaf epidermis จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 10x)



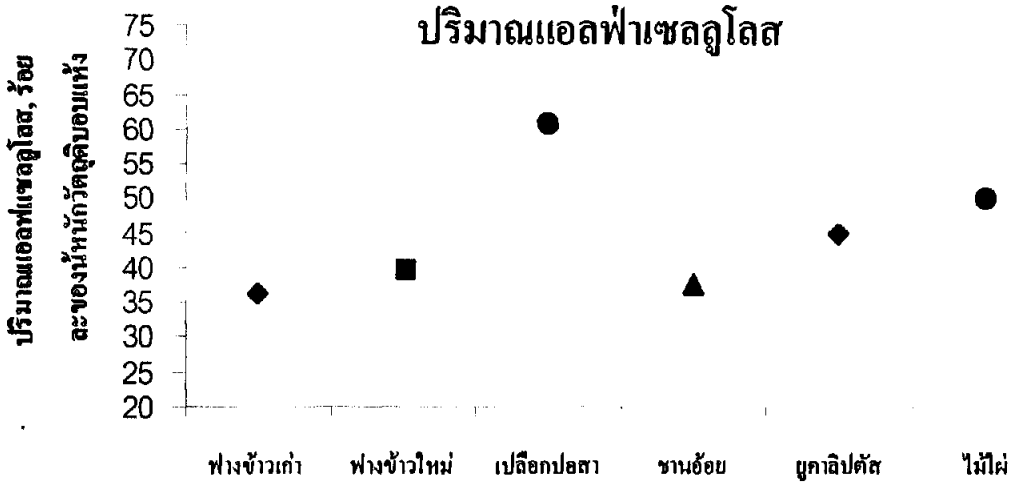
ภาพที่ 14 แสดง leaf epidermis จากเยื่อฟางข้าวใหม่ (กำลังขยาย 20x)



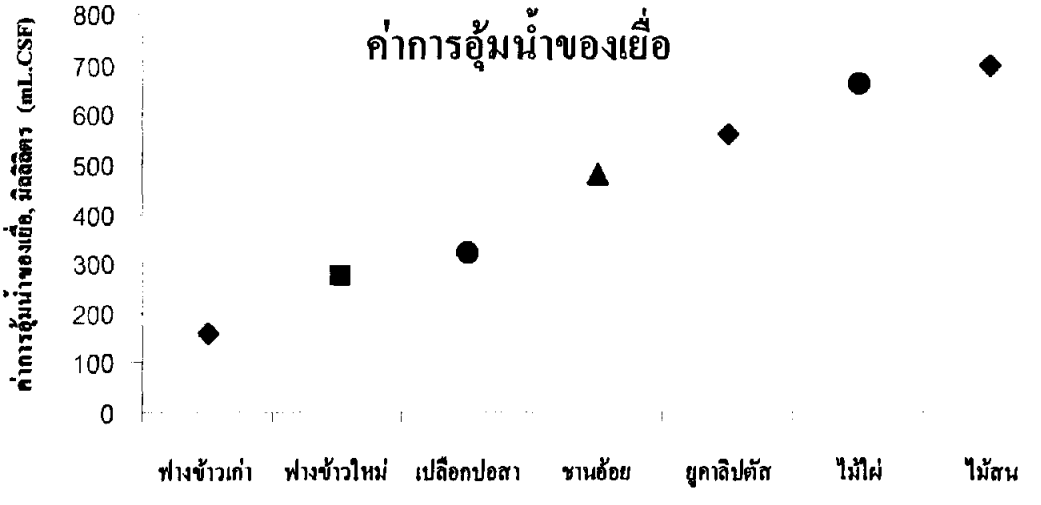
ภาพที่ 15 แสดงกราฟ ปริมาณเถ้าของฟางข้าวเก่า ฟางข้าวใหม่ และไม้ชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 16 แสดงกราฟ การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ของฟางข้าวเก่า ฟางข้าวใหม่ และไม้ชนิดอื่นๆ

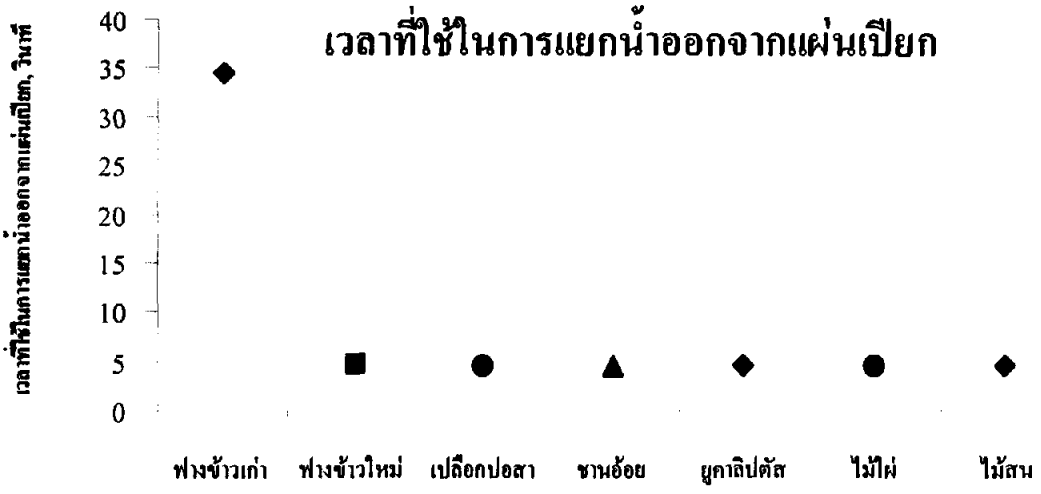


ภาพที่ 17 แสดงกราฟ ปริมาณแอลฟ่าเซลลูโลส ของฟางข้าวเก่า ฟางข้าวใหม่ และไม้ชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 18 แสดงกราฟ ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า เยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ และเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ

- ค่าการอุ้มน้ำของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่ามีค่าเท่ากับ 160 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่และเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 19 แสดงกราฟ เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก ของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่า เยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่ และเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ

- เวลาที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแผ่นเปียก ของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวเก่ามีค่าเท่ากับ 34.4 วินาที ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวใหม่และเยื่อจากไม้ชนิดอื่นๆ