

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว

ของ

นายจิระศักดิ์ ชัยสนิท

เรื่องที่ 2

การผลิตและฟอกเยื่อจากฟางข้าวโดยไม่ใช้สารคลอรีน

ผู้ร่วมดำเนินการ

นายสมชาย ศิริเลิศพิทักษ์

โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

2546

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

**เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว**

ของ

นายจิระศักดิ์ ชัยสนิท

เรื่องที่ 2

เลขหมู่ กศ.พร
ดว 6
เลขทะเบียน 13913
วันที่ 25/ 8-01/ 49

การผลิตและฟอกเยื่อจากฟางข้าวโดยไม่ใช้สารคลอรีน

ผู้ร่วมดำเนินการ

นายสมชาย ศิริเลิศพิทักษ์

โครงการฟลิกส์และวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

2546

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บทคัดย่อ

รายงานนี้เสนอผลการศึกษาระบบการผลิตเชื้อจากฟางข้าวฟอกขาวแบบไม่ใช้สารคลอรีน โดยมีขั้นตอนการฟอกดังนี้ ขั้นแอสซิด - ขั้นการสกัดด้วยด่างโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย - ขั้นเปอร์ออกไซด์ [A(EP)P] และขั้นออกซิเจนโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย - ขั้นการสกัดด้วยด่างโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย - ขั้นเปอร์ออกไซด์ [(OP)(EP)P] ผลการทดลองพบว่าการฟอกแบบ A(EP)P ให้ผลผลิตเชื้อสูงกว่าการฟอกแบบ (OP)(EP)P โดยการฟอกแบบ A(EP)P และ (OP)(EP)P ให้ผลผลิตเชื้อเท่ากับร้อยละ 93.3 และ 92.1 ตามลำดับ แต่ถือว่าผลผลิตเชื้อที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเชื้อฟางข้าวชัลไฟท์ฟอกขาวแบบ A(EP)P มีค่าความขาวสว่างร้อยละ 73.9 และเชื้อฟางข้าวชัลไฟท์ฟอกขาวแบบ (OP)(EP)P มีค่าความขาวสว่างร้อยละ 75.3

เมื่อเทียบทั้งสองกระบวนการฟอกแบบ A(EP)P และ (OP)(EP)P กับกระบวนการผลิตเชื้อจากฟางข้าวฟอกขาวแบบใช้คลอรีนพบว่า ค่าดัชนีความต้านแรงดึง ค่าดัชนีความต้านแรงฉีกขาด และค่าดัชนีความต้านแรงฉีกขาดสูงที่สุดกว่า ทั้งนี้เพราะเส้นใยมีความสมบูรณ์กว่า โดยมีค่าดัชนีความต้านแรงดึงเท่ากับ 31.2, 32.0 และ 29.1 กิโลนิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม ค่าดัชนีความต้านแรงฉีกขาดเท่ากับ 3.16, 3.25 และ 2.97 นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และค่าดัชนีความต้านแรงฉีกขาดเท่ากับ 2.09, 2.14 และ 1.92 กิโลพาสคัล-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

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 ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์	3
2.1 การฟอกเยื่อ	3
2.2 วัตถุประสงค์ของการฟอกเยื่อ	3
2.3 วิธีการฟอกเยื่อ	3
2.4 กระบวนการฟอกเยื่อ	4
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย	12
3.1 วัสดุ	12
3.2 อุปกรณ์	12
3.3 สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม	12
3.4 วิธีดำเนินการ	14
3.4.1 ศึกษาการผลิตเยื่อฟางข้าวชัลไฟฟ้า	14
3.4.2 ศึกษาการฟอกเยื่อฟางข้าวแบบไม่ใช้สารคลอรีน	16
3.4.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลของเยื่อฟางข้าวชัลไฟฟ้าแบบไม่ใช้สารคลอรีน	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและข้อวิจารณ์	20
4.1 ศึกษาการผลิตเยื่อฟางข้าวชัลไฟฟ้า	20
4.2 ศึกษาการฟอกเยื่อฟางข้าวแบบไม่ใช้สารคลอรีน	21
4.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟางข้าวชัลไฟฟ้าฟอกขาวแบบไม่ใช้สารคลอรีนกับเยื่อฟอกของโรงงาน	23

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	27
คำขอบคุณ	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก ก. คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ – ทดสอบ	30
ภาคผนวก ข. มาตรฐานวิธีทดสอบ	32

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงสัญลักษณ์ของขั้นตอนการฟอกและสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ	4
2	แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้และสภาวะการฟอก	8
3	แสดงสมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าว และปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ	20
4	แสดงสมบัติทางเชิงกลของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์	20
5	แสดงสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวที่ได้จากการฟอกเยื่อแบบ A(EP)P	21
6	แสดงสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวที่ได้จากการฟอกเยื่อแบบ (OP)(EP)P	22
7	เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวกับเยื่อฟอกของโรงงาน	23

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงกระบวนการฟอกเชื้อแบบดั้งเดิม	4
2	แสดงการฟอกด้วยธาตุคลอรีน (chlorination stage, C) แสดง chlorine-water equilibrium as function of pH	5
3	แสดงปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารประกอบอินทรีย์หรือลิกนิน จะเกิดปฏิกิริยาทั้ง addition substitution และ oxidation โดยการ hydrolysis ที่ alkylaryl ether bond	6
4	แสดงกระบวนการฟอกเชื้อแบบไม่ใช้ธาตุคลอรีน	9
5	แสดงคลอรีนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับลิกนินที่ phenolic acid (1) เกิด free radical (2) แล้วเปลี่ยน โครงสร้างเป็น Muconic acid (4) และ o-quinone (5)	10
6	แสดงปฏิกิริยาของออกซิเจนทำปฏิกิริยากับลิกนิน ภายในสภาวะที่เป็นต่าง phenoxy anion (1) ในโครงสร้างของลิกนิน ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยา oxidation กับลิกนิน เปลี่ยนโครงสร้างเป็น hydroperoxide (3) หลังจากนั้นจะแตกตัวให้สารประกอบของ muconic acid (4) แต่ถ้าในปฏิกิริยามีโลหะหนักผสมอยู่ hydroperoxide (3) จะแตกตัวให้สารประกอบของ o-quinone (6)	10
7	แสดงไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยา oxidation กับลิกนินเปลี่ยนโครงสร้างของ ลิกนินเป็นสารประกอบของ quinone	11
8	เปรียบเทียบค่าความขาวสว่างของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวฟอกขาว [A(EP)P/(OP)(EP) P]	25

การผลิตและฟอกเยื่อจากฟางข้าวโดยไม่ใช้สารคลอรีน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย

โลกปัจจุบันกำลังประสบภาวะปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ในด้านต่างๆ ทั้งสิ่งที่เป็นมลพิษในบรรยากาศ ในน้ำ และในพื้นดิน ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์และสัตว์ต่างๆ ต้องตกอยู่สภาพที่รับสารพิษซึ่งปะปนอยู่ทั้งในอากาศที่ใช้หายใจ น้ำดื่ม/น้ำใช้เพื่อการอุปโภค/บริโภค พืชพรรณธัญญาหารที่ปลูกในพื้นดินและน้ำใช้จากแม่น้ำลำคลองและน้ำฝน สิ่งต่างๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นวัฏจักรที่ทำให้สิ่งมีชีวิตได้รับผลอันเกิดจากมลพิษที่เป็นผลสืบเนื่องจากการปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การเพิ่มปริมาณผลผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อปริมาณการบริโภคของประชาคมโลกที่เพิ่มขึ้น การคิดค้น/การใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ อย่างต่อเนื่อง และการทิ้งของเสียอันเกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งมีหลากหลายชนิดในปริมาณสูงมากที่มนุษย์และธรรมชาติไม่สามารถกำจัดได้ รวมทั้งของเสียที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ/ของกิน-ของใช้ ในชีวิตประจำวัน ที่มีปริมาณมากเพิ่มขึ้น สำหรับในส่วนของกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ถ้าหากได้มีการพัฒนารูปแบบ/การเลือกใช้เทคโนโลยี/สารเคมี ที่เหมาะสมก็จะช่วยให้สารพิษที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยลง หรือมีปริมาณในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและธรรมชาติสามารถบำบัดได้ด้วยกลไกที่มีอยู่

ในการฟอกเยื่อกระดาษให้มีความขาวสว่างสูงขึ้น โดยการใช้คลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนจะทำให้เกิดสารประกอบที่เรียกว่า chlorinated organic compound ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างคลอรีนกับคาร์บอนอะตอมขึ้นเป็นจำนวนมาก สารประกอบนี้ยากแก่การทำลายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ เกิดขึ้นได้เนื่องจากในขั้นตอนของการฟอกเยื่อด้วยคลอรีนนั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี 2 แบบ คือ การแทนที่ (substitution) และการเติม (addition) ในปฏิกิริยาการแทนที่จะเกิดสารประกอบประเภท discrete compound ซึ่งประกอบด้วยคลอรีนอะตอมตั้งแต่ 1, 2, 3 อะตอม หรือมากกว่าขึ้นไป สารดังกล่าวจะถูกปล่อยออกมาทางน้ำทิ้งของโรงงานในรูปของ AOX หรือ สารประกอบเฮโลเจนอินทรีย์ ส่วนในปฏิกิริยาการเติมคลอรีนจะสร้างพันธะโควาเลนต์กับลิกนิน ให้สารประกอบ dioxin ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงยากแก่การทำลายและจะติดค้างอยู่ในเยื่อกระดาษโดยไม่ถูกปล่อยออกมาปะปนกับน้ำทิ้ง นอกจากนี้ยังช่วยลด ปริมาณ BOD, COD, AOX และความเข้มของสีในน้ำทิ้งของโรงงาน

จะเห็นว่าเทคโนโลยีการฟอกเยื่อถ้าใช้ก๊าซคลอรีนในการฟอก จะเป็นกระบวนการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิม (conventional process) หรือถ้าใช้สารประกอบคลอรีนในกระบวนการฟอกจะเรียกว่ากระบวนการฟอกเยื่อแบบปราศจากธาตุคลอรีน (Elemental Chlorine Free process ; ECF) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมดังกล่าวข้างต้น จึงได้ดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาการผลิตเยื่อแบบที่ไม่ใช้สารคลอรีน (Total Chlorine Free Pulp ;

TCFP) เพื่อเป็นการช่วยป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อมโดยได้นำฟางข้าวซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษภายในประเทศมาทำการศึกษาทดลองโดยจะใช้ออกซิเจน ไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์ และสารคีเลตติง (chelating agent) เป็นสารฟอกเข้ามาแทนที่คลอรีนในขั้นตอนการฟอกเยื่อ ผลที่ได้รับจะทำให้ได้เยื่อที่ไม่ใช้สารคลอรีน ความรู้ที่ได้จากการวิจัยนี้จะทำให้มีเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตเยื่อที่ไม่ใช้สารคลอรีน

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการผลิตและฟอกเยื่อจากฟางข้าวโดยไม่ใช้สารคลอรีน

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

เพื่อให้การศึกษามีความเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้จึงได้กำหนดขอบเขตการดำเนินงานดังนี้

- 1.3.1 ศึกษาการผลิตเยื่อฟางข้าวโดยใช้กระบวนการต้มเยื่อแบบซัลไฟท์ (sulphite process)
- 1.3.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อแบบไม่ใช้สารคลอรีน โดยการฟอกแบบ 4 ขั้นตอน ซึ่งมีรูปแบบการฟอกเป็นแบบ $A(EP)P_1P_2$ และ $(OP)(EP)P_1P_2$
- 1.3.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟอกแบบไม่ใช้สารคลอรีนกับเยื่อฟอกที่ใช้คลอรีน

1.4 ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย ตุลาคม 2545 - กันยายน 2546

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 นำความรู้ที่ได้ถ่ายทอดให้กับภาคเอกชน โดยประยุกต์ใช้ในการผลิตเยื่อฟอกที่ปราศจากคลอรีนในขั้นอุตสาหกรรม

1.5.2 เป็นการเพิ่มพูนประสบการณ์และความรู้ทางด้านเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อที่ไม่ใช้สารคลอรีนซึ่งแตกต่างจากใช้กระบวนการฟอกเยื่อแบบเดิมของเจ้าหน้าที่ของกลุ่มเยื่อและกระดาษ สำนักเทคโนโลยีชุมชน

1.5.3 กระบวนการดังกล่าวจะช่วยให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้นเนื่องจากช่วยลดปริมาณสารพิษที่เกิดจากการใช้คลอรีน

บทที่ 2

ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์

2.1 การฟอกเยื่อ (bleaching)

การฟอกเยื่อเป็นการทำให้เยื่อกระดาษ (Pulp) มีสีขาวเหมาะแก่การนำไปผลิตเป็นกระดาษพิมพ์และเขียนหรือกระดาษที่ใช้ในการสื่อสารต่าง ๆ นับแต่ปี พ.ศ. 2327 คลอรีนถูกค้นพบในการใช้เป็นสารฟอกเยื่อ โดยชาวสวีเดน ชื่อ นาย Scheele เป็นต้นมา ได้มีการพัฒนากระบวนการฟอกเยื่อตลอดเวลา เพื่อให้ได้เยื่อที่มีความขาวสูงขึ้น โดยมีการพัฒนาทั้งสารเคมีที่ใช้ในการฟอก(สัญลักษณ์) เช่น แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (H) คลอรีนไดออกไซด์ (D) ก๊าซออกซิเจน (O) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (P) โอโซน (Z) และเอ็นไซม์ (X) หรือกระบวนการที่ใช้ในการฟอกเยื่อ เช่น CEHEH, DEDED, D(EP)D(EO)D, D(EO)D, OD(EO)D, OD(EOP)D XD(EOP)D, ZOP ซึ่งการพัฒนานี้เพื่อที่จะทำให้ได้เยื่อฟอกที่มีความขาวสว่างตามต้องการแล้วในขณะเดียวกัน ไม่ส่งผลเสียหยาบ ต่อสมบัติทางกายภาพของเยื่อที่ได้หลังฟอก ตลอดจนไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

2.2 วัตถุประสงค์ของการฟอกเยื่อ

- 2.2.1 การเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อโดยทำให้เยื่อสีน้ำตาล (Unbleached Pulp) มีสีขาวเหมาะกับการทำกระดาษเพื่อการพิมพ์และเขียนเป็นหลัก
- 2.2.2 เพื่อลดต้นทุนในการฟอกให้น้อยที่สุด สารฟอกส่วนมากมีราคาแพง ดังนั้นกระบวนการฟอกจึงต้องใช้ปริมาณสารฟอกที่เหมาะสมและใช้ต้นทุนน้อยที่สุด
- 2.2.3 ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการฟอกต้องไม่มีผลเสียหยาบต่อสิ่งแวดล้อม

2.3 วิธีการฟอกเยื่อ การฟอกเยื่อมี 2 วิธี

2.3.1 การฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออกไป (removeing lignin)

การฟอกโดยใช้วิธีกำจัดลิกนินออกไป โดยมากใช้กับเยื่อเคมีซึ่งนำไปผลิตกระดาษเพื่อการพิมพ์เขียน ที่ต้องการความขาวสว่างสูง ๆ โดยใช้สารเคมี เช่น คลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้วกำจัดลิกนินออกไป การฟอกแบบนี้มีหลายขั้นตอนการฟอก โดยทั่วไปจะมีตั้งแต่ 3-6 ขั้นตอน (CEH , CEDEP, CEOP) เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างสูงประมาณร้อยละ 80-95 ขั้นตอนในการฟอกจะมีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอกและขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียก เช่น การฟอกแบบ CEDED

2.3.2 การฟอกเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (bleaching lignin)

การฟอกเยื่อแบบนี้สารเคมีที่ใช้ฟอกเยื่อจะทำปฏิกิริยากับลิกนินและเปลี่ยนสีของลิกนิน ให้อยู่ในรูปของสารที่ปราศจากสี เยื่อฟอกมีความขาวสว่างปานกลาง และไม่คงทนเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการกลับสี โดยความขาวสว่างจะลดลงและกระดาษจะมีสีเหลือง สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การฟอกแบบนี้เหมาะกับการฟอกเยื่อไม้บด ซึ่งไม่ต้องการความขาวสว่างมากนักแต่ต้องการผลผลิตเยื่อสูง เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ เป็นต้น

2.4 กระบวนการฟอกเยื่อ

การฟอกเยื่อแบบหลายขั้นตอน โดยทั่วไปจะมีตั้งแต่ 3 - 5 ขั้นตอน (CEH , CEDEP, CEOP, CEDED) เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างสูงประมาณร้อยละ 80-95 ขั้นตอนในการฟอกจะมีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอก และขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียก เช่น การฟอกแบบ CEDED แสดงดังตารางที่ 1

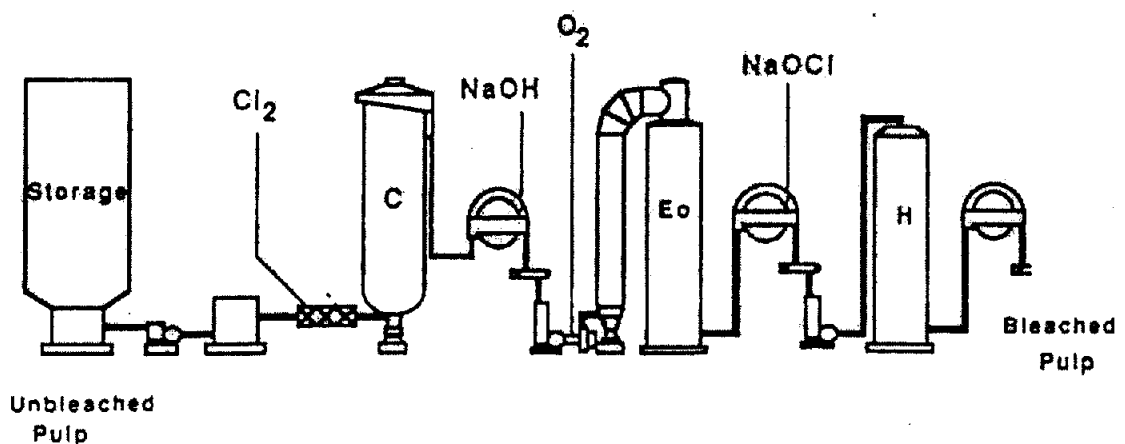
ตารางที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ของขั้นตอนการฟอกและสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

สารเคมี	สูตรทางเคมี	สัญลักษณ์	ชื่อขั้นตอนการฟอก
Sulphuric acid	H_2SO_4	A	ขั้นแอซิด (Acid stage)
Chlorine	Cl_2	C	ขั้นคลอรีเนชัน (Chlorination stage)
Calcium hypochlorite	$Ca(OCl_2)$	H	ขั้นไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite stage)
Sodium hydroxide	NaOH	E	ขั้นการสกัดด้วยด่าง (Extraction stage)
Chlorine dioxide	ClO_2	D	ขั้นคลอรีน ไดออกไซด์ (Chlorine dioxide stage)
Oxygen	O_2	O	ขั้นออกซิเจน (Oxygen stage)
Hydrogen peroxide	H_2O_2	P	ขั้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide stage)
Ozone	O_3	Z	ขั้นโอโซน (Ozone stage)
Enzymes	-	X	ขั้นเอนไซม์ (Enzymes stage)

2.4.1 การผลิตเยื่อฟอกขาวแบบดั้งเดิม (Conventional Bleaching) ประกอบด้วยการฟอกแบบหลายขั้นตอน โดยเริ่มด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

- การฟอกด้วยธาตุคลอรีน (chlorination stage, C)
- การสกัดด้วยด่าง (extraction stage, E)
- การฟอกด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite stage, H)

เขียนย่อเป็น C-E-H ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิม

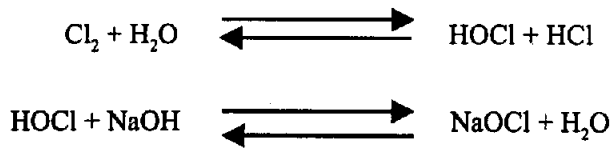
- ขั้นคลอรีเนชัน (chlorination stage , C) เป็นการฟอกด้วยก๊าซคลอรีน

ปริมาณการใช้คลอรีนจะมีความสัมพันธ์กับค่า κ number ของเชื้อก่อนฟอก โดยทั่วไปจะคำนวณปริมาณการใช้คลอรีนในการฟอก จากสูตร

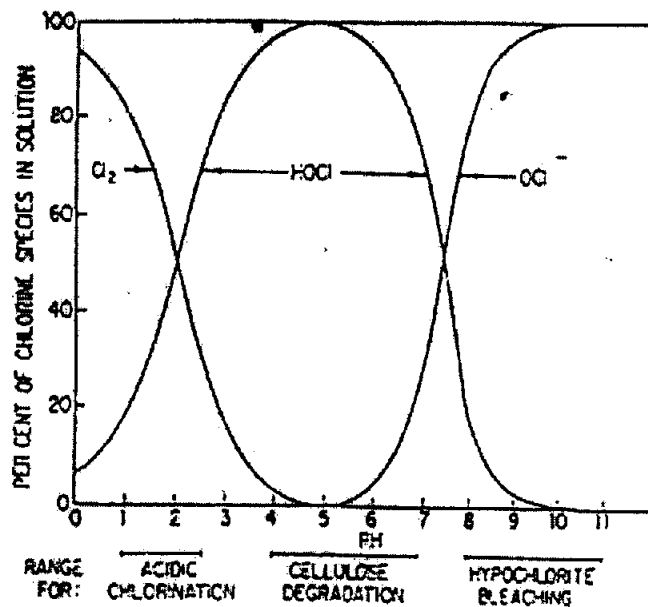
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณคลอรีน, ร้อยละ} &= \kappa \text{ number} \times 0.22 \\ C/K &= 0.22 \quad (\text{ตั้งแต่ } 0.22-0.24) \\ C &= \text{chlorine charge} \\ K &= \kappa \text{ number} \end{aligned}$$

ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reactions)

ขั้น Chlorination ปฏิกิริยาเกิดจากก๊าซคลอรีนที่ละลายในน้ำ ดังสมการ



ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) แสดงภาพที่ 2

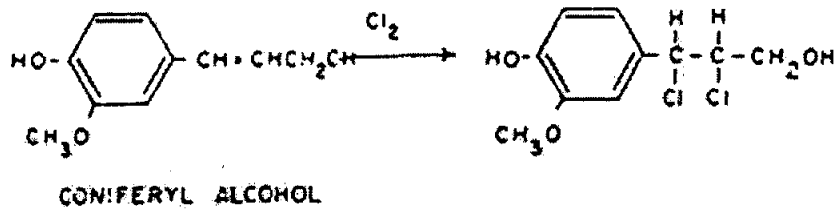


ภาพที่ 2 แสดงการฟอกด้วยธาตุคลอรีน (chlorination stage, C) แสดง chlorine water equilibrium as function of pH

ปฏิกิริยาหลักที่สารประกอบคลอรีนทำปฏิกิริยากับลิกนิน คือ

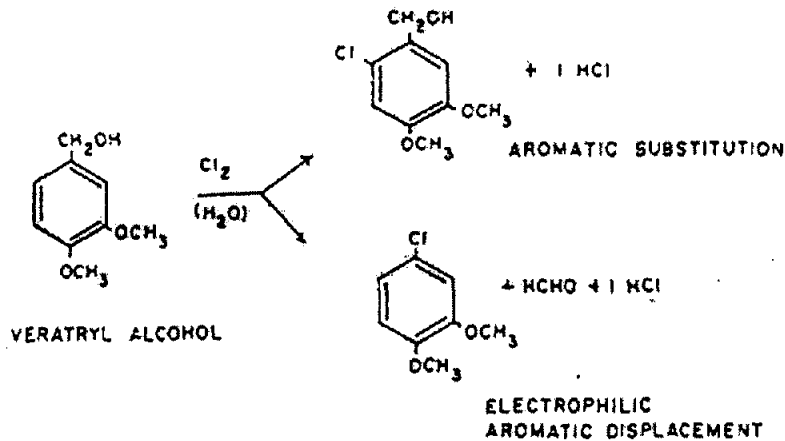
- Addition
- Substitution
- Oxidation

ปฏิกิริยา Addition

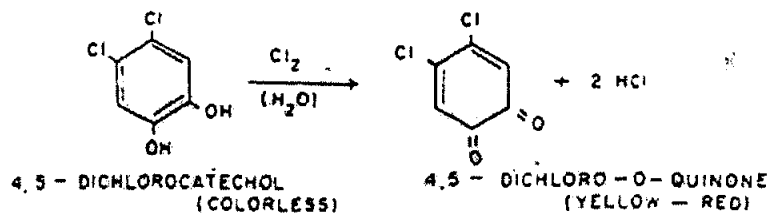


- คลอรีนจะทำปฏิกิริยา addition โดยสร้างพันธะโควาเลนต์ที่พันธะคู่ (double bond) ใน side chain ของลิกนิน

ปฏิกิริยา Substitution



- คลอรีนจะทำปฏิกิริยา substitution ที่ aromatic ring ของลิกนินปฏิกิริยา Oxidation



- คลอรีนจะทำปฏิกิริยา Oxidation ที่พันธะอีเทอร์ (ether bond) ของลิกนิน

ภาพที่ 3 แสดงปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารประกอบอินทรีย์หรือลิกนิน จะเกิดปฏิกิริยาทั้ง addition substitution และ oxidation โดยการ hydrolysis ที่ alkylaryl ether bond

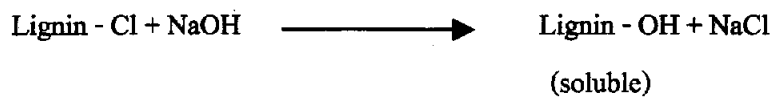
กระบวนการฟอกเชื้อจะทำให้ได้เชื้อสีขาวโดยการใส่คลอรีน จะทำให้เกิดสารประกอบที่เรียกว่า chlorinated organic compound จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างคลอรีนและอะตอมของคาร์บอน สารประกอบนี้ยากแก่การทำลายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขั้นตอนการฟอกเชื้อด้วยคลอรีนจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นทั้งแบบ addition และ substitution ในปฏิกิริยา addition คลอรีนจะทำปฏิกิริยาเฉพาะลิกนินและสารสกัดได้ (extractives) ไม่ทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส และในปฏิกิริยา substitution จะทำให้เกิด discrete compound ซึ่งประกอบด้วยคลอรีนอะตอมตั้งแต่ 1, 2, 3 หรือมากกว่า ส่วนในปฏิกิริยา

เลนส์ (covalent bond) กับคลอรีน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และจะสร้างสารประกอบใหม่ขึ้น ซึ่งสารประกอบนี้ยากต่อการทำลายไม่ว่าจะใช้การ hydrolysis หรือ dissolution สารประกอบพวกนี้ก็ยังคงติดค้างอยู่ในเยื่อในรูปของ chlorinated dioxin ส่วน discrete compound ซึ่งเกิดปฏิกิริยา substitution จะถูกปล่อยออกมาทางน้ำทิ้ง (discharged effluent) ของโรงงานในรูปของ "AOX" หรือ organic halogen compound ในต่างประเทศมีกฎหมายที่เข้มงวดมากต่อการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แม่น้ำลำคลอง โดยเฉพาะน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งการกำหนดค่า AOX มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นสารพิษที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมนี้

● ขั้นการสกัดด้วยด่าง (extraction stage,E)

ขั้นการสกัดด้วยด่างเป็นการละลายและกำจัด chlorinated lignin เนื่องจากลิกนินที่ผ่านการฟอกด้วยคลอรีน จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซึ่งยังคงไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในด่างจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการสกัด ด้วยด่างหลังจากขั้นคลอรีนขั้น และในขณะเดียวกันจะสามารถละลายยางไม้ และสารสกัดได้ที่มีอยู่ในเยื่อได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามหากใช้ด่างที่มีความเข้มข้นและอุณหภูมิสูงก็อาจเกิดการทำลายเฮมิเซลลูโลส รวมถึงเซลลูโลสได้ด้วย จึงจำเป็นต้องควบคุมสภาวะการฟอกให้เหมาะสม

ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reactions)

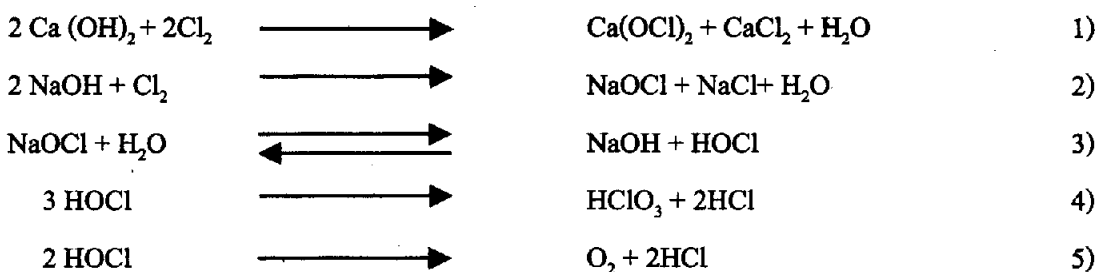


ขั้นการสกัดด้วยด่างนี้อาจจะใช้สาร Oxidizing agent บางตัวช่วยเสริม (Oxidative Extraction) เช่น hydrogen peroxide หรือ Oxygen ช่วยเสริมในการฟอก เช่น การฟอกแบบ Ep, Eo เพื่อเป็นการลดปริมาณ ด่างที่ใช้ รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินด้วย และจะเป็นการลดปริมาณสาร ฟอกในขั้นตอนต่อไปด้วย

● ขั้นไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite stage,H)

ขั้นไฮโปคลอไรท์ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ เป็นสารฟอกนิยมใช้ในการฟอกตั้งแต่อดีตเนื่องจาก ราคาถูก แต่เนื่องจากไฮโปคลอไรท์มีการทำลายเซลลูโลสค่อนข้างมาก ในปัจจุบันจึงนิยมใช้คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide) และเปอร์ออกไซด์ ทดแทนการใช้ไฮโปคลอไรท์

ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reactions)



จาก สมการ $3, \text{OCI}^-$ จะทำปฏิกิริยา oxidation กับลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังผ่านกระบวนการฟอกในขั้นคลอรีนชัน ทำให้เยื่อมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นมาก แต่ในขณะที่เยื่อทำปฏิกิริยา oxidation นั้นไม่มีความเฉพาะเจาะจงกับลิกนินเท่านั้น แต่ยัง oxidized กับเซลลูโลสและคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ ในเยื่อได้อีกด้วย จึงทำให้ให้ความแข็งแรงของเยื่อลดลงมาก ในปัจจุบันไม่นิยมใช้ไฮโปคลอไรท์ในการฟอกเยื่อ Cl_2 , HOCl , OCI^- ที่มีในน้ำคลอรีนจะอยู่ในรูปใดก็ขึ้นกับความเข้มข้น (pH) จากสมการ 3 ภาพที่ 2 ความเป็นกรด-ด่าง 9-11 (excess alkali) จะเกิด hypochlorous acid (OCI) ถ้าในปฏิกิริยามีปริมาณด่างไม่เพียงพอ จะเกิดการ decomposition ตามสมการ 4, 5 (ความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 9) และถ้ามี metallic salt ของ iron, copper, cobalt, manganese ปฏิกิริยา decomposition จะเกิดได้เร็วขึ้น

- สารเคมีที่ใช้และขั้นตอนในการฟอก

การเลือกใช้สารฟอกและขั้นตอนในการฟอกจะขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อและวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ ถึงแม้ว่าสารฟอกจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อแต่ละชนิด แต่ในขณะที่เยื่อทำปฏิกิริยาที่ใช้ก็จะทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นสารฟอกจำเป็นต้องถูกเลือกให้เหมาะสมเพื่อกำจัดลิกนินออกให้มากที่สุดและยังป้องกันการทำลายส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดขั้นตอนในการฟอกขึ้นมาเป็นแบบหลายขั้นตอนเพื่อให้ความขาวสว่างมากที่สุด โดยยังคงรักษาความแข็งแรงของตัวเส้นใยไว้ และผลผลิตเยื่อที่ได้หลังผ่านกระบวนการฟอกต้องไม่สูญเสียมากนัก รวมทั้งการใช้ต้นทุนในการผลิตเยื่อฟอกขาวให้น้อยที่สุดด้วย

- ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการฟอก

เนื่องจากในกระบวนการฟอกนั้นปฏิกิริยาทางเคมีของสารฟอกที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของเส้นใย ดังนั้นจึงต้องควบคุมสถานะการฟอกให้เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 2 ปัจจัยที่สำคัญๆ ได้แก่

1. อุณหภูมิ (Temperature)
2. เวลา (Time)
3. ความข้นของน้ำเยื่อ (consistency)
4. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

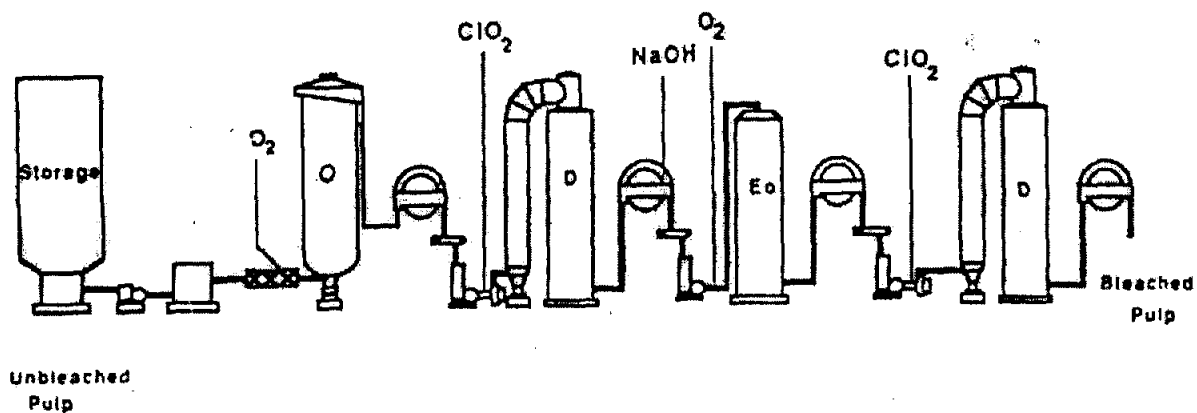
ตารางที่ 2 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้และสถานะการฟอก

สถานะการฟอกเยื่อ	C stage	E stage	H stage	D stage	P stage	O stage
ปริมาณสารเคมีที่ใช้, ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง		2-3	2-3	0.4-0.8	2-3	2-3 0.4-0.8 Mpa 60-120 psi
ความข้นของน้ำเยื่อ, ร้อยละ (Pulp consistency)	3-4	10-18	4-18	10-12	30	20-30 10-12
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	10-12	11-12	3-10	3.5-6.0	8-10	10-12
อุณหภูมิ, °C	20-30	50-95	40-55	60-80	60-70	90-110
เวลา, ชั่วโมง	0.3-1.5	0.8-1.5	1-5	3-5	2-4	0.3-1.0

2.4.2 กระบวนการฟอกแบบไม่ใช้สารคลอรีน (Total Chlorine Free Bleaching Process) หรือ กระบวนการฟอกเยื่อแบบปราศจากธาตุคลอรีน (Elemental Chlorine Free Bleaching Process)

ปัจจุบันกระบวนการฟอกได้พยายามลดการใช้ปริมาณคลอรีนลง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากสารพิษจากสารประกอบคลอรีน โดยได้มีการใช้ขั้นตอนของออกซิเจน เพื่อช่วยลดปริมาณลิกนินในขั้นตอนแรก และใช้คลอรีนไดออกไซด์มาทดแทนขั้นตอนของการใช้คลอรีน นอกจากนั้นการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเยื่อเคมีก็เป็นที่นิยมกันมากขึ้นและกระบวนการฟอกในอนาคตมีความเป็นไปได้ที่จะใช้โอโซน หรือ การฟอกแบบชีวภาพมากขึ้น เพื่อทดแทนสารฟอกที่ยังมีองค์ประกอบของธาตุคลอรีนอยู่

การฟอกเยื่อที่ใช้คลอรีน คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับลิกนินให้สารประกอบที่เรียกว่า chlorinated organic compounds ออกมา เช่น AOX (adsorbable organic halogen compounds) และ Dioxin (polychlorinated dibenzop-dioxin) ซึ่ง AOX จะละลายออกมากับน้ำทิ้งของโรงงาน ส่วน Dioxin ส่วนใหญ่จะตกค้างอยู่ในเยื่อสารประกอบทั้ง 2 ชนิดนี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากเนื่องจากเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จึงได้มีการพยายามลดการใช้คลอรีนในขั้นตอนการฟอก โดยนำเอาออกซิเจน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโอโซน มาฟอกแทนการใช้คลอรีน โดยมีขั้นตอนการฟอกเป็น ZEP, OEP, ZP ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่มีการใช้ธาตุคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนในการฟอกเลย เยื่อที่ได้เรียกว่า "เยื่อที่ไม่ใช้สารคลอรีน", (total chlorine free pulp, TCFP) หรืออาจจะเหลือเฉพาะการใช้สารประกอบคลอรีน คือ คลอรีนไดออกไซด์ ซึ่งเรียกเยื่อที่ได้ว่า "เยื่อที่ปราศจากธาตุคลอรีน" (element chlorine free pulp, ECFP) โดยมีขั้นตอนการฟอกเป็น DED, OD(EP)D, OD(EP)D แสดงดังภาพที่ 4

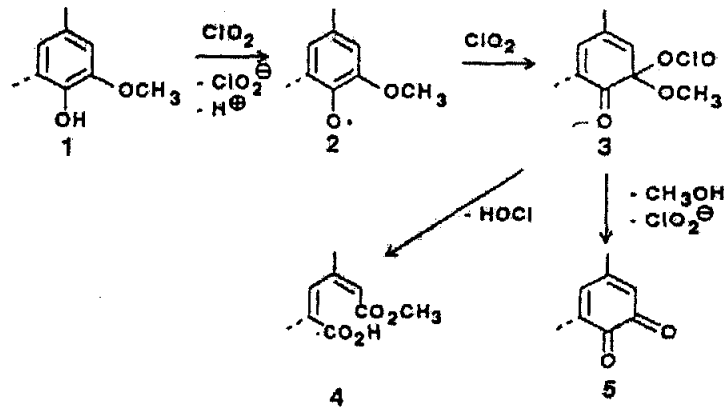
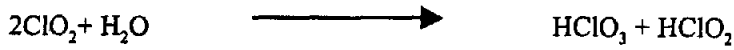


ภาพที่ 4 แสดงกระบวนการฟอกเยื่อแบบปราศจากธาตุคลอรีน

• ขั้นตอนคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine Dioxide stage)

คลอรีนไดออกไซด์เป็นสารฟอกที่นำมาใช้แทนสารคลอรีน โดยแต่เดิมนั้นใช้เป็น oxidizing agent เพื่อลดปริมาณยางไม้ (resin) ในเยื่อหลังผ่านการฟอกขั้นการสกัดด้วยด่างเท่านั้น แต่เนื่องจากคลอรีนไดออกไซด์ไม่ทำลายความแข็งแรงของเส้นใยและเยื่อมีการกลับสีน้อยกว่าการฟอกด้วยคลอรีน จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารฟอกในเวลาต่อมา นอกจากนี้การฟอกโดยใช้คลอรีนไดออกไซด์จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเยื่อฟอกที่ได้จะมีสาร Dioxin ในเยื่อ หรือ AOX ในน้ำทิ้ง เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

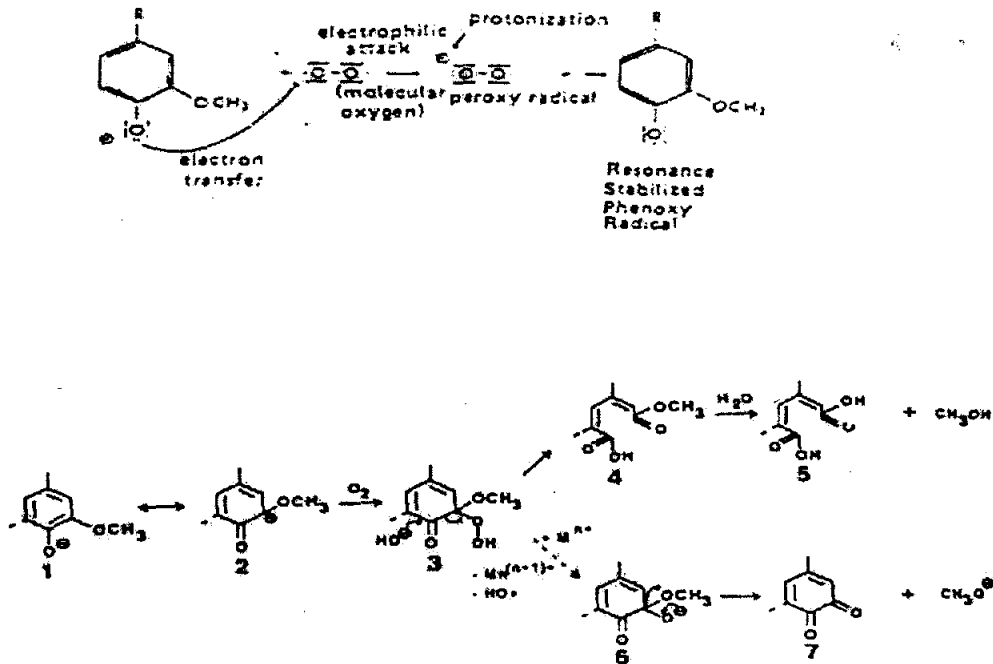
ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reactions)



ภาพที่ 5 แสดงคลอรีนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับลิกนินที่ phenolic acid (1) เกิด free radical (2) แล้วเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Muconic acid (4) และ o-quinone (5)

• ขั้นตอนออกซิเจน (Oxygen stage)

เป็นการพอกเชื้อที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการเกิดสารประกอบ AOX และสาร Dioxin ข้อดีอีกประการหนึ่งของการพอกด้วยออกซิเจน คือ มีความเฉพาะเจาะจงต่อลิกนินสูง และไม่ทำลายคาร์โบไฮเดรต ในปัจจุบันนิยมใช้ออกซิเจนเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการพอก



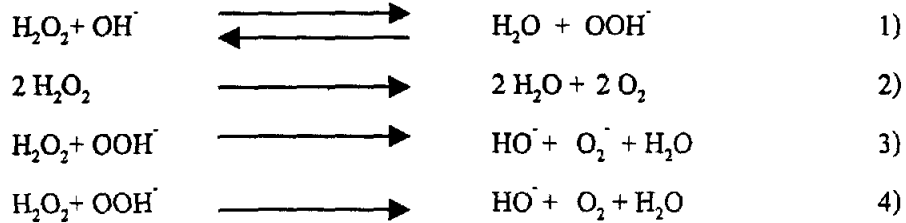
ภาพที่ 6 แสดงปฏิกิริยาของออกซิเจนทำปฏิกิริยากับลิกนินภายในสภาวะที่เป็นด่าง phenoxy anion (1) ในโครงสร้างของลิกนินออกซิเจนจะทำปฏิกิริยา oxidation กับลิกนินเปลี่ยน โครงสร้างเป็น hydroperoxide (3) หลัง

จากนั้นจะแตกตัวให้สารประกอบของ muconic acid (4) แต่ถ้าในปฏิกิริยามีโลหะหนักผสมอยู่ hydroperoxide (3) จะแตกตัวให้สารประกอบของ o-quinone (6)

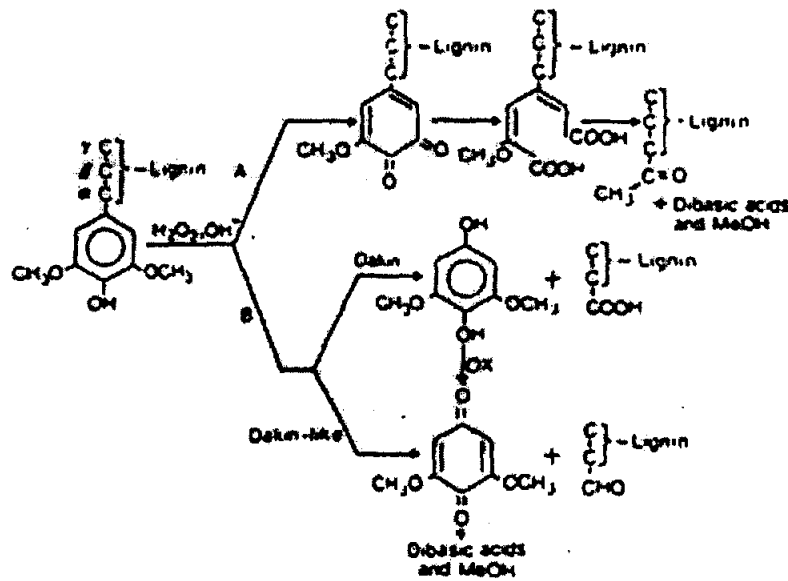
● **ขั้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide stage)**

การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้ นิยมใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเพิ่มความขาวสว่างสูงสุด และความคงทนของการกลับสี เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนินซึ่งมีสีไปเป็นสารประกอบควิโนนซึ่งไม่มีสี

ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reactions)



ในสภาวะที่เป็นด่าง (alkali condition) ความเป็นกรด-ด่างในช่วง 10.5-11.0 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ ทำให้เกิดหมู่เปอร์ไฮดรอกซิลอิออน (perhydroxyion, OOH^-) ดังสมการที่ 1 แต่ถ้าความเป็นกรด-ด่างสูงมากกว่า 11.5 จะเกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เป็นน้ำและออกซิเจน ดังสมการที่ 2 และในการสลายตัวจะเกิดหมู่ของ radical ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก ดังสมการที่ 3 และ 4 ปฏิกิริยาในการเป็นสารฟอกของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะเกิดที่หมู่ของเปอร์ไฮดรอกซิลอิออนทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้วเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนินเป็นสารประกอบของ quinone ซึ่งไม่มีสี



ภาพที่ 7 แสดงไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยา oxidation กับลิกนินเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนินเป็นสารประกอบของ quinone

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ

3.1 วัสดุที่ใช้

ซึ่งเป็นฟางข้าวที่ได้หลังฤดูเก็บเกี่ยวนาปรังจากพื้นที่นาข้าวบริเวณคลอง 5 จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเก็บเกี่ยวได้ประมาณ 10 วัน มีสีเหลืองอ่อนและมีความชื้นประมาณร้อยละ 15

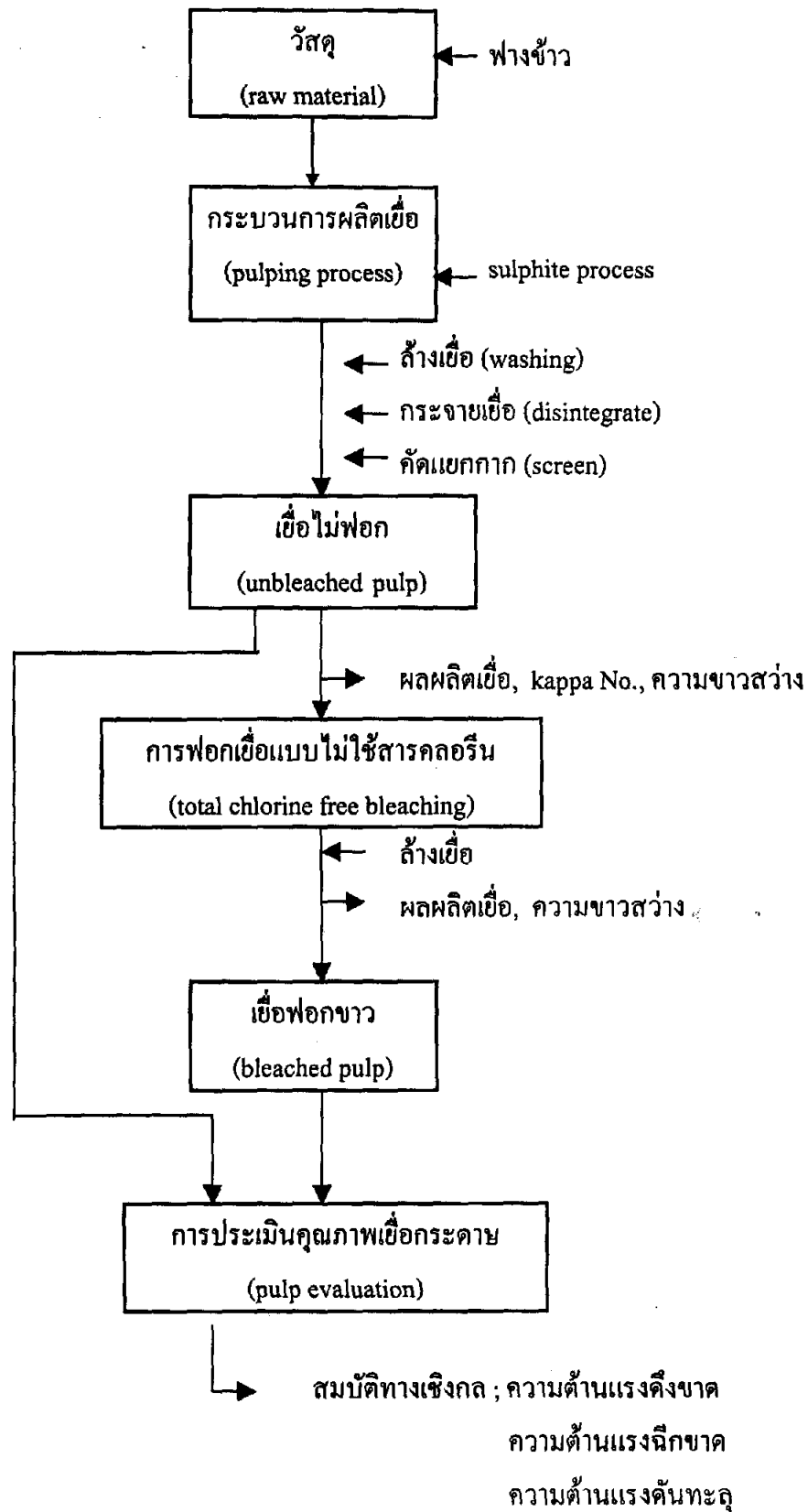
3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 หม้อนึ่งความดัน (autoclave)
- 3.2.2 เครื่องกระจายเชื้อ (disintegrator)
- 3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก (analytical balance)
- 3.2.4 เครื่องคัดแยกขนาด (vibratory flat screen)
- 3.2.5 เครื่องบดเชื้อ (beater) แบบ PFI-mill
- 3.2.6 เครื่องทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน (standard handsheet machine)
- 3.2.7 กรวยกรองแบบแก้ว (fritted glass buchner funnel)
- 3.2.8 เครื่องทดสอบการอุ้มน้ำของเชื้อ (freeness tester)
- 3.2.9 เครื่องทดสอบความหนา (thickness tester)
- 3.2.10 เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงขาด (tensile tester)
- 3.2.11 เครื่องทดสอบความต้านแรงฉีกขาด (tear tester)
- 3.2.12 เครื่องทดสอบความต้านแรงดันทะลุ (burst tester)
- 3.2.13 เครื่องทดสอบความชื้น (moisture balance)
- 3.2.14 เครื่องวัดความขาวสว่าง (brightness tester)
- 3.2.15 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
- 3.2.16 เครื่องให้ความร้อนด้วยโพลีเอทิลีน ไกลคอล (polyethyleneglycol bath)

3.3 สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม

- 3.3.1 ก๊าซออกซิเจน (oxygen gas) ใช้ก๊าซออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90 และอัดลงในหม้อต้มทรงกระบอก ที่ความดัน 5.0 kg/cm^2
- 3.3.2 กรดซัลฟูริก (sulphuric acid) แบบ analar grade เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (W/V)
- 3.3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) แบบ analar grade เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (W/V)
- 3.3.4 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) แบบ analar grade เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (W/V)
- 3.3.5 โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) แบบ analar grade เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 2 (W/V)
- 3.3.6 แมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium sulphate) แบบ analar grade เตรียมให้มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (W/V)

แผนผังแสดงการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาว



3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาการผลิตเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์

โดยใช้กระบวนการดัดเยื่อแบบซัลไฟท์ (sulphite process)

3.4.1.1 ชั่งฟางข้าว 200 กรัม น้ำหนักอบแห้งบรรจุลงในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) แล้วเทส่วนผสมของน้ำยาดัดเยื่อตามสภาวะการทดลองที่กำหนด ดังนี้

สภาวะการดัดเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์	
โซเดียมซัลไฟท์ (sodium sulphite) , ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	9
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง	3
อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดเยื่อ (cooking temperature), องศาเซลเซียส	165
- เวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิถึง 165 องศาเซลเซียส (raising time to temperature), ชั่งโมง	1
เวลาที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส (cooking time), ชั่งโมง	180
- อัตราส่วนฟางข้าวต่อน้ำ (wood : liquor ratio)	1:3.5

บรรจุลงในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) แยกทำทีละตัวอย่าง แล้วเทส่วนผสมของน้ำยาดัดเยื่อตามสภาวะการทดลองที่กำหนด ปิดฝาหม้อดัดเยื่อทรงกระบอกแล้วอัดอากาศให้มีความดัน 3.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปล่อยอากาศออกจากหม้อดัดเยื่อทรงกระบอกแล้วใส่ลงในเครื่องให้ความร้อนด้วยโพสิทีฟลิ้นกลคอลล โดยที่หม้อนึ่งความดันถูกติดตั้งอยู่บนเพลลาซึ่งหมุนตลอดเวลา มีการควบคุมอุณหภูมิและเวลาตามสภาวะการทดลองที่กำหนด เมื่อดัดเยื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำหม้อดัดเยื่อลงในน้ำเย็นประมาณ 3 นาที แล้วเทน้ำคั่วออกเก็บน้ำคั่วไว้เพื่อวิเคราะห์หา ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในการดัดเยื่อ

นำเยื่อที่ได้มาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาแล้วนำไปกระจายเพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกันเป็นเวลา 3 นาที ในเครื่องกระจายเยื่อ (LW disintegrator) แล้วนำไปร่อนคัดกากด้วยเครื่องคัดแยกขนาด (vibratory flat screen) มีขนาดร่อน 0.008 นิ้ว เพื่อแยกกากเยื่อหรือส่วนที่ดัดไม่สุก (rejected yield) ออกจากผลผลิตเยื่อ (accepted yield) นำเยื่อที่ได้ไปคำนวณ/วิเคราะห์ ดังนี้

1. ผลผลิตเยื่อ (total yield ; accepted and rejected yield)
2. kappa number เพื่อหาปริมาณลิกนินในเยื่อ 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 เพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกล 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
- ความต้านแรงคั่นทะลุ (Burst strength) ตาม Tappi T 403 om-85

- ในการทดสอบสมบัติทางเชิงกลและทางทัศนศาสตร์ ของแผ่นทดสอบมาตรฐานที่เตรียมได้ จะต้องเก็บแผ่นทดสอบไว้ในห้องควบคุมสภาวะการทดสอบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส 27 ± 1

ความชื้นสัมพัทธ์, ร้อยละ 65 ± 2

3.4.2 ศึกษาการฟอกเยื่อฟางข้าวแบบไม่ใช้สารคลอรีน

ในกระบวนการฟอกแบบไม่ใช้สารคลอรีน (Total Chlorine Free; TCF) โดยนำเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ที่ได้ ซึ่งเป็นเยื่อที่ยังไม่ผ่านการฟอก เรียกเยื่อนี้ว่า “เยื่อไม่ฟอก (unbleached pulp)” มาทำการฟอกให้ขาวขึ้น โดยใช้การฟอกแบบ 3 ขั้นตอน แบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบ A (EP) P และ (OP) (EP) P ซึ่งการฟอกของแต่ละขั้นตอนจะเรียกชื่อตามสารเคมีที่ใช้ และใช้สัญลักษณ์เพื่อเรียกชื่อแทนขั้นตอนการฟอก รายละเอียด ดังนี้

ขั้นตอนการฟอก	ชื่อเรียกของขั้นตอนการฟอก	สารเคมีที่ใช้
A	ขั้นแอซิด (acid stage)	H ₂ SO ₄
(OP)	ขั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (oxygen cooking with hydrogen peroxide stage)	O ₂ , H ₂ O ₂
(EP)	ขั้นการสกัดด้วยด่าง โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (extraction with hydrogen peroxide stage)	NaOH, H ₂ O ₂
P	ขั้นเปอร์ออกไซด์ (peroxide stage)	H ₂ O ₂

โดยในการศึกษาการฟอกเยื่อฟางข้าว ได้กำหนดการใช้ปริมาณสารฟอก ดังนี้

ปริมาณการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าว		
ขั้นตอนการฟอก	ปริมาณสารเคมี, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง	
	A(EP)P	(OP)(EP)P
ขั้นแอซิด (A) ซัลฟูริกแอซิด	3.0	-
ขั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (OP) ออกซิเจน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมซัลเฟต	- - - -	excess 1.0 4.0 1.0
ขั้นการสกัดด้วยด่าง โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (EP) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1.5 3.0	1.5 3.0
ขั้นเปอร์ออกไซด์ (P) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ แมกนีเซียมซัลเฟต	3.0 adjust pH to 10.5 2.0 0.05	3.0 2.0 0.05

หมายเหตุ ในการพอกแบบ A(EP)P และ (OP)(EP)P จะต่างกันเฉพาะในขั้นตอนแรกที่ใช้ชั้นแอซิด และชั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยเท่านั้น

3.4.2.1 ชั้นแอซิด (A)

ซึ่งเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์หนัก 400 กรัมน้ำหนักอบแห้ง บรรจุเยื่อลงในถุงพลาสติกทนความร้อน แล้วเติมสารละลายของกรดซัลฟูริก ตามปริมาณการใช้ที่กำหนด ปรับความชื้นของน้ำเยื่อให้ได้เท่ากับร้อยละ 3.5 (เป็นความชื้นของน้ำเยื่อตามสภาวะที่กำหนด) คลุกเคล้าให้เข้ากันดีปิดปากถุงให้แน่น นำไปแช่ลงในอ่างน้ำร้อน ที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที ระหว่างช่วงเวลาพอกให้นำถุงเยื่อขึ้นมา นวดเพื่อคลุกเคล้าเยื่อและน้ำยาพอกให้เข้ากันดีเป็นครั้งคราว เพื่อให้ปฏิกิริยาการพอกเยื่อเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีสภาวะการพอกในชั้นแอซิด ดังนี้

สภาวะการพอกในชั้นแอซิด	
ความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ	3.5
อุณหภูมิ (temperature), องศาเซลเซียส	70
เวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิถึง 70 องศาเซลเซียส (raising time to temperature), นาที	30
เวลา (time) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส, นาที	60

3.4.2.2 ชั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (OP)

ซึ่งเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์หนัก 300 กรัมน้ำหนักอบแห้ง ทำให้เยื่อมีความชื้นประมาณร้อยละ 30 แล้วเติมสารเคมีทั้ง 3 ชนิดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแมกนีเซียมซัลเฟต ตามปริมาณการใช้ที่กำหนด ซึ่งภายหลังเติมสารเคมีทั้งหมดแล้วจะมีความชื้นของน้ำเยื่อเท่ากับร้อยละ 20 ปิดฝาหม้อต้มให้เรียบร้อย ทำการดูดอากาศออกที่ -800 มิลลิบาร์ (millibar) แล้วอัดก๊าซออกซิเจนที่ความดัน 5.0 kg/cm² นาน 3 นาที หลังจากนั้นใส่ลงในเครื่องให้ความร้อนด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอลโดยที่หม้อทรงกระบอก ถูกติดตั้งอยู่บนเพลลาซึ่งหมุนตลอดเวลา ทำการควบคุมอุณหภูมิและเวลาตามสภาวะการทดลองที่กำหนด ซึ่งมีสภาวะการพอกในชั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย ดังนี้

สภาวะการพอกในชั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย	
ความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ	20
อุณหภูมิ (temperature), องศาเซลเซียส	110
เวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิถึง 110 องศาเซลเซียส (raising time to temperature), นาที	30
เวลา (time) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, นาที	60

3.4.2.3 ขั้นตอนการสกัดด้วยต่าง โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (EP)

3.4.2.3.1 ชั่งเยื่อฟางข้าวแชลไฟท์ที่ผ่านการฟอกชั้นแอสิด (A) หนัก 200 กรัม นำหนักอบแห้ง บรรจุเยื่อลงในถุงพลาสติกทนความร้อน แล้วเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามปริมาณการใช้ที่ใช้ที่กำหนด ปรับความข้นของน้ำเยื่อให้ได้เท่ากับร้อยละ 10 (เป็นความข้นของน้ำเยื่อตามสภาวะที่กำหนด) คลุกเคล้าให้เข้ากันดีปิดปากถุงให้แน่น นำไปแช่ลงในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที ระหว่างช่วงเวลาฟอกให้น้ำดูเยื่อขึ้นมานวดเพื่อคลุกเคล้าเยื่อและน้ำยาฟอกให้เข้ากันดี เป็นครั้งคราว เพื่อให้ปฏิกิริยาการฟอกเยื่อเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีสภาวะการฟอกในขั้นตอนการสกัดด้วยต่าง โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย ดังนี้

สภาวะการฟอกเยื่อด้วยต่าง โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย	
ความข้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ	10
อุณหภูมิ (temperature), องศาเซลเซียส	70
เวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิถึง 70 องศาเซลเซียส (raising time to temperature), นาที	30
เวลา (time) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส, นาที	120

3.4.2.3.2 ดำเนินการเหมือนข้อ 3.4.2.3.1 แต่ใช้เยื่อฟางข้าวแชลไฟท์ที่ผ่านการฟอกในชั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (OP) เป็นวัตถุดิบแทน

3.4.2.4 ขั้นตอนเปอร์ออกไซด์ (P)

3.4.2.4.1 ชั่งเยื่อฟางข้าวแชลไฟท์ (A(EP)) หนัก 100 กรัม นำหนักอบแห้ง บรรจุเยื่อลงในถุงพลาสติกทนความร้อน แล้วเติมสารละลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟต์ และแมกนีเซียมซัลเฟต ตามปริมาณการใช้ที่กำหนด ปรับความข้นของน้ำเยื่อให้ได้เท่ากับร้อยละ 10 (เป็นความข้นของน้ำเยื่อตามสภาวะที่กำหนด) คลุกเคล้าให้เข้ากันดีปิดปากถุงให้แน่น นำไปแช่ลงในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที ระหว่างช่วงเวลาฟอกให้น้ำดูเยื่อขึ้นมานวดเพื่อคลุกเคล้าเยื่อและน้ำยาฟอกให้เข้ากันดี เป็นครั้งคราว เพื่อให้ปฏิกิริยาการฟอกเยื่อเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีสภาวะการฟอกในขั้นตอนเปอร์ออกไซด์ ดังนี้

สภาวะการฟอกเยื่อด้วยเปอร์ออกไซด์	
ความข้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ	10
อุณหภูมิ (temperature), องศาเซลเซียส	70
เวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิถึง 70 องศาเซลเซียส (raising time to temperature), นาที	30
เวลา (time) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส, นาที	120

3.4.2.4.2 ดำเนินการเหมือนข้อ 2.4.2.4.1 แต่ใช้เยื่อฟางข้าวแชลไฟท์ (Op-Ep) เป็นวัตถุดิบแทน

หมายเหตุ การฟอกเยื่อที่มีขั้นตอนการฟอกต่อเนื่องกันจะทำให้ได้น้ำหนักของเยื่อที่จะนำไปผ่านขั้นตอนต่อไปน้อยลงตามลำดับ

3.4.2.5 เมื่อครบกำหนดเวลาของแต่ละขั้นตอน ให้นำถุงเยื่อออกมาจากภาชนะที่ใช้แล้ว แยกน้ำออกจากเยื่อโดยใช้กรวยกรองแบบแก้ว (fritted glass buchner funnel) เพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวและเยื่อออกจากกัน จึงทำการล้างเยื่อที่ค้างอยู่บนกรวยให้สะอาด แล้วนำเยื่อที่ได้ไปหาความชื้นเพื่อคำนวณหาผลผลิตเยื่อ (yield) แล้วนำเยื่อที่ได้ แบ่งทดสอบหาค่าความขาวสว่าง (brightness) ส่วนของเหลวที่แยกออกนำไปคำนวณหาความสิ้นเปลืองของปริมาณสารเคมีที่ถูกใช้ไป ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการฟอกเยื่อของแต่ละขั้นตอน ในการวิเคราะห์หาค่าความขาวสว่าง ทำโดยแบ่งเยื่อไปทำแผ่นทดสอบความขาวสว่างตามมาตรฐาน Scan C11-75 ซึ่งเป็นสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ แล้ววัดค่าความขาวสว่างด้วยเครื่อง Elropho 2000 ตามมาตรฐาน ISO 2470

3.4.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางเชิงกลของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวแบบไม่ใช้สารคลอรีน

นำเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวทั้ง 2 แบบของการฟอก (A(EP)P และ (OP)(EP)P) ไปทำแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 205 om-88 โดยบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อชนิด PFI mill ตามมาตรฐาน TAPPI T 248 เพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกล ดังนี้

- ความต้านแรงดึงขาด ตามมาตรฐาน TAPPI T 404 om-92
- ความต้านแรงฉีกขาด ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-82
- ความต้านแรงคั้นทะลุ ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-85

ในการทดสอบสมบัติทางเชิงกลและทางทัศนศาสตร์ ของแผ่นทดสอบมาตรฐานที่เตรียมได้ จะต้องเก็บแผ่นทดสอบไว้ในห้องควบคุมสภาวะการทดสอบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส 27 ± 1

ความชื้นสัมพัทธ์, ร้อยละ 65 ± 2

บทที่ 4

ผลการทดลองและข้อวิจารณ์

4.1 ศึกษาการผลิตเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ (sulphite process)

การผลิตเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ โดยใช้ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 9 และ 3 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าว และปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ

สมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าว	
ผลผลิตเยื่อ, ร้อยละของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้งเริ่มต้น	45.9
กากเยื่อ, ร้อยละ	0.11
ความขาวสว่าง, ร้อยละ	38.0
ค่า kappa number, หน่วย	15.0
ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์ที่ถูกใช้ไป, ร้อยละของปริมาณโซเดียมซัลไฟท์ที่เติม	100
ปริมาณของโซเดียมซัลไฟท์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันฟางข้าวอบแห้ง	196
ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป, ร้อยละของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติม	100
ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันฟางข้าวอบแห้ง	65.4

ผลการทดลองพบว่าที่ระดับการต้มเยื่อซัลไฟท์ร้อยละ 9 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง ตามสภาวะที่กำหนด จะให้ผลผลิตเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์เท่ากับร้อยละ 45.9 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง เยื่อที่ได้มีค่าความขาวสว่างร้อยละ 38.0 ค่า kappa number เท่ากับ 15.0 หน่วย และในการผลิตเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าว 1 ตัน จะใช้โซเดียมซัลไฟท์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 196 และ 65.4 กิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงสมบัติทางเชิงกลของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์

สมบัติทางเชิงกล	เยื่อฟางข้าวซัลไฟท์
จำนวนรอบของการบด, รอบ	0
การอุ้มน้ำของเยื่อ (freeness), มิลลิลิตร (ml. CSF)	280
ดัชนีความต้านแรงดึงขาด, กิโลนิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม	28.6
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด, นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม	3.96
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด, กิโลพาสคัล-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม	1.75

ผลจากการทดลองพบว่าเยื่อที่ได้มีการอุ้มน้ำของเยื่อ 280 มิลลิลิตร (ml. CSF) และมีค่าดัชนีความต้านแรงดึงขาด ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด และดัชนีความต้านแรงคืนทะเลว เท่ากับ 28.6 กิโลนิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม, 3.96 นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัมและ 1.75 กิโลพาสคัล-ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

4.2 ศึกษาการฟอกเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์แบบไม่ใช้สารคลอรีน

ในการฟอกเยื่อเลือกใช้กระบวนการฟอกแบบไม่ใช้สารคลอรีน (Total Chlorine Free; TCF) ใช้วัตถุดิบเป็นเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ มาทำการฟอกให้ขาวขึ้น โดยการฟอกแบบ 3 ขั้นตอน เป็นแบบ A(EP)P และ (OP)(EP)P ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 แสดงสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวที่ได้จากการฟอกเยื่อแบบ A(EP)P

สมบัติของเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าว	ขั้นเอซิด [A]	ขั้นการสกัดด้วยด่าง (EP)	ขั้นเปอร์ออกไซด์ [P]	เยื่อฟอกแบบ A(EP)P
ผลผลิตเยื่อ, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเริ่มต้น	97.0	98.2	97.9	93.3
ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกใช้ไป, ร้อยละของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติม	-	70.5	-	-
ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง	-	10.6	-	10.6
ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกใช้ไป, ร้อยละของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติม	-	80.1	77.5	-
ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง	-	24.0	23.3	47.3
ความขาวสว่าง, ร้อยละ (เริ่มต้น = 38.0)	47.4	63.4	73.9	73.9

การทดลองฟอกเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ แบบ A(EP)P ผลจากการทดลองพบว่า

1. ผลผลิตเยื่อในแต่ละขั้นของการฟอกเท่ากับร้อยละ 97.0, 98.2 และ 97.9 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ จะเห็นว่าเยื่อฟอกที่ได้ในแต่ละขั้นมีการสูญเสียผลผลิตเยื่อเพียงเล็กน้อย

2. ความสิ้นเปลืองปริมาณสารเคมีที่ใช้

2.1 ในขั้นการสกัดด้วยด่างโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (EP) จะสิ้นเปลืองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 10.6 และ 24.0 กิโลกรัมต่อการผลิตเยื่อ 1 ตัน ตามลำดับ

2.2 ในขั้นเปอร์ออกไซด์ จะสิ้นเปลืองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 23.2 กิโลกรัมต่อการผลิตเยื่อฟอกขาว 1 ตัน ตามลำดับ

3. ค่าความขาวสว่างของเยื่อฟอกแบบ A(EP)P ที่ได้ในแต่ละขั้นตอนของการฟอกเท่ากับร้อยละ 47.4 , 63.4 และ 73.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 แสดงสมบัติของเยื่อฟางข้าวชัลไฟฟ้าฟอกขาวที่ได้จากการฟอกเยื่อแบบ (OP)(EP)P

สมบัติของเยื่อชัลไฟฟ้าฟางข้าว	ขั้น (ออกซิเจน) [OP]	ขั้นการ สกัดด้วย ด่าง (EP)	ขั้นเปอร์ ออกไซด์ [P]	เยื่อฟอก แบบ (OP)(EP)P
ผลผลิตเยื่อ, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง	97.3	96.2	98.4	92.1
ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป, ร้อยละของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติม	-	62.1	-	-
ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง	-	9.37	-	9.37
ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกใช้ไป, ร้อยละของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติม	89.1	68.2	51.0	-
ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกใช้ไป, กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง	8.91	20.5	15.3	44.7
ความขาวสว่าง, ร้อยละ (เริ่มต้น = 38.0)	48.6	65.9	75.3	75.3

การทดลองฟอกเยื่อฟางข้าวชัลไฟฟ้าแบบ (OP)-(EP)-P ผลจากการทดลองพบว่า

1. ผลผลิตเยื่อในแต่ละขั้นของการฟอกเท่ากับร้อยละ 97.3, 96.2 และ 98.4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ตามลำดับ จะเห็นว่าเยื่อฟอกที่ได้ในแต่ละขั้นมีการสูญเสียผลผลิตเยื่อเพียงเล็กน้อย

2. ความสิ้นเปลืองปริมาณสารเคมีที่ใช้

2.1 ขั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (OP) จะสิ้นเปลืองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 8.91 กิโลกรัมต่อการผลิตเยื่อ 1 ตัน (คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 303 บาท)

2.2 ขั้นการสกัดด้วยด่างที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (EP) จะสิ้นเปลืองโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 9.37 และ 20.5 กิโลกรัมต่อการผลิตเยื่อ 1 ตัน ตามลำดับ (คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 697 บาท)

2.3 ขั้นเปอร์ออกไซด์สิ้นเปลืองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 15.3 กิโลกรัมต่อการผลิตเยื่อ 1 ตัน (คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 520 บาท)

รวมค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 1,520 บาท ต่อการผลิตเยื่อฟอกขาว 1 ตัน

3. ค่าความขาวสว่างของเยื่อฟอกแบบ (OP)-(EP)-P ที่ได้ในแต่ละขั้นตอนของการฟอกเท่ากับร้อยละ 48.6 , 65.9 และ 75.3 ตามลำดับ

4.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวแบบไม่ใช้สารคลอรีนกับเยื่อฟอกของโรงงาน

เยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวทั้ง 2 แบบ [A(EP) P และ(OP)(EP) P] มาประเมินคุณภาพเพื่อศึกษาสมบัติทางเชิงกลของเยื่อฟอกขาวที่ได้เปรียบเทียบกับเยื่อฟอกแบบดั้งเดิมของโรงงาน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวกับเยื่อฟอกของโรงงาน

สมบัติทางเชิงกล	เยื่อฟางข้าว	เยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาว		
		แบบไม่ใช้สารคลอรีน		เยื่อฟอกของ โรงงาน
		A(EP) P	(OP)(EP) P	
จำนวนรอบของการบด, รอบ	0	500	500	500
การอุ้มน้ำของเยื่อ, มิลลิลิตร (ml.CSF)	280	300	290	300
ความขาวสว่าง, ร้อยละ	38.0	73.9	75.3	73.0
ดัชนีความต้านแรงดึงขาด, กิโลนิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม	28.6	31.2	32.0	29.1
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด, นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม	3.96	3.16	3.25	2.97
ดัชนีความต้านแรงคั้นทะลุ, กิโลพาสคัล-ตารางเมตรต่อกรัม	1.75	2.09	2.14	1.92

ที่ระดับการบดเยื่อเดียวกัน (ที่ 500 รอบ ด้วยเครื่องบดแบบ PFI-mill) ผลการทดลองพบว่า

1. ความขาวสว่างของเยื่อฟอก [ผ่านการฟอกแบบ A(EP) P / (OP)(EP) P] มีค่าเท่ากับร้อยละ 73.9/75.3 เมื่อเปรียบเทียบเยื่อฟอกจากโรงงาน (ผ่านการฟอกแบบ CEH) จะเห็นว่า เยื่อฟอก A(EP) P มีค่าสูงกว่าร้อยละ 0.9 (73.9-73.0) และเยื่อฟอกแบบ (OP)(EP) P มีค่าสูงกว่าร้อยละ 2.3 (75.3-73.0)

2. ดัชนีความต้านแรงดึงขาด ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด และดัชนีความต้านแรงคั้นทะลุของเยื่อฟอกแบบไม่ใช้สารคลอรีน [ผ่านการฟอกแบบ A(EP) P / (OP)(EP) P] มีค่าเท่ากับ 31.2/32.0 กิโลนิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม, 3.16/3.25 นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และ 2.09/2.14 นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในทางปฏิบัติถือว่าไม่แตกต่างกันมากนักและเยื่อ ฟอกทั้ง 2 แบบ [ผ่านการฟอกแบบ A(EP) P / (OP)(EP) P] มีค่าดัชนีความต้านแรงดึงขาด ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด และดัชนีความต้านแรงคั้นทะลุสูงกว่าเยื่อฟอกของโรงงาน

4.4 ศึกษาการผลิตเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ (sulphite process)

4.4.1 ที่ระดับการต้มเยื่อโดยใช้โซเดียมซัลไฟท์ร้อยละ 9 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง (ใช้ระดับการต้มเท่ากับโรงงานที่ใช้ต้มเยื่อ) เยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวที่ได้มีผลผลิตเยื่อร้อยละ 45.9 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง มีค่า kappa

number เท่ากับ 15.0 ซึ่งค่า kappa number ที่ได้นี้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของโรงงานฯ มีค่าเท่ากับ 15.5 ซึ่งถือว่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งค่า kappa number ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมสถานะการต้มอย่างเหมาะสมกว่า

4.4.2 ความสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อคิดเป็นปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 196 และ 65.4 กิโลกรัมต่อการผลิตเยื่อ 1 ตัน ตามลำดับ ซึ่งเยื่อที่ผลิตได้มีคุณภาพที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อต่อไป

4.5 ศึกษาวิจัยการฟอกเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าว

4.5.1 การฟอกเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวแบบไม่ใช้สารคลอรีนโดยใช้การฟอกเป็นแบบ 3 ขั้นตอน มีรูปแบบการฟอกเป็น A(EP)P และ (OP)(EP)P พบว่าการฟอกแบบ A(EP)P ให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่าการฟอกแบบ (OP)(EP)P โดยการฟอกแบบ A(EP)P และ (OP)(EP)P ให้ผลผลิตเยื่อเท่ากับร้อยละ 93.3 และ 92.1 ตามลำดับ (ลดลงร้อยละ 1.3) แสดงว่าการใช้ก๊าซออกซิเจนโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยทำให้ผลผลิตเยื่อ ลดลงเล็กน้อย แต่ถือว่าไม่แตกต่างกัน มากนัก

4.5.2 ความขาวสว่างของเยื่อฟอกในขั้นตอนการฟอกด้วยกรด (A) จะให้ความขาวสว่างต่ำกว่าเยื่อฟอกในขั้นตอนออกซิเจนที่มีเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยร้อยละ 1.2 (47.4 – 48.6) จะเห็นว่าการฟอกเยื่อในขั้นตอนออกซิเจนที่มีเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยจะเพิ่มค่าความขาวสว่างได้มากกว่า ตามตารางที่ 5 และ 6 แสดงว่าออกซิเจนและเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการนำลิกนินออกจากเส้นใยได้ดีกว่าการฟอกด้วยกรด

4.5.3 ความสิ้นเปลืองปริมาณสารเคมีที่ใช้

4.5.3.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เติมลงไปในการสกัดด้วยด่าง (ขั้น EP) ที่ถูกใช้ในการฟอกเยื่อทั้ง 2 แบบ โดยมีปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในเยื่อฟอกแบบ A(EP)P และ (OP)(EP)P เท่ากับ 10.6 และ 9.37 กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้งตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในเยื่อฟอกแบบ A(EP)P มากกว่าเยื่อฟอกแบบ (OP)(EP)P ตามตารางที่ 5 และ 6

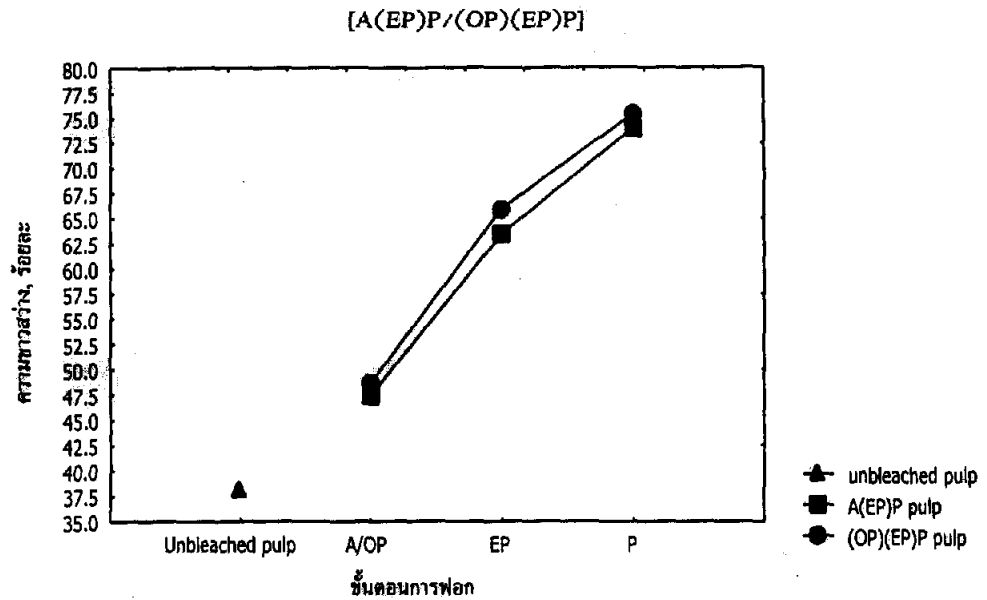
4.5.3.2 ปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากตารางที่ 5 และ 6 จะเห็นว่าการฟอกเยื่อทั้ง 2 แบบ [A(EP)P และ (OP)(EP)P]

- ในการฟอกด้วยออกซิเจนโดยมีเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (OP) ที่ระดับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง จะสิ้นเปลืองการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 8.91 กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง

- ในขั้นตอนการสกัดด้วยด่างโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (ขั้น EP) การฟอกในขั้นนี้เป็นการฟอกที่จะละลายลิกนินที่ถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออกจากเยื่อได้ ผลจากการทดลองพบว่าเยื่อฟอกแบบ A(EP) และเยื่อฟอกแบบ (OP)(EP) ที่ระดับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง จะสิ้นเปลืองการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 24.0 และ 20.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง ตามลำดับ จะเห็นว่าเยื่อฟอกที่ผ่านการฟอกในขั้นแอสซิดเมื่อนำมาฟอกต่อในขั้น EP จะสิ้นเปลืองการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าเยื่อที่ผ่านการฟอกในขั้น OP ถึง 3.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากเยื่อฟอกที่ผ่านการฟอกใน

ชั้นแอซิดประสิทธิภาพของกรด ที่เปลี่ยน โครงสร้างของลิกนิน ได้น้อยกว่าการใช้ออกซิเจนที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย

ภาพที่ 8 เปรียบเทียบค่าความขาวสว่างของเยื่อซัลไฟฟางข้าวฟอกขาว



จากภาพที่ 8 จะเห็นได้จากค่าความขาวสว่างของเยื่อฟอกที่ได้ ในชั้นแอซิดจะมีค่าความขาวสว่างเท่ากับร้อยละ 47.4 เยื่อฟอกในชั้น OP มีความขาวสว่างเท่ากับร้อยละ 48.6 เมื่อนำเยื่อทั้ง 2 (เยื่อ A และ เยื่อ OP) มาฟอกต่อในขั้นตอนการฟอกด้วย EP ที่ระดับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเหมือนกัน เยื่อ (OP) (EP) จะมีค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อ A (EP) ถึงร้อยละ 2.5 (65.9-63.4) แสดงว่าการฟอกในชั้นออกซิเจนที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนินได้มากกว่าทำให้เมื่อนำมาฟอกในขั้นการสกัดด้วยด่างที่มีเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยนั้นเยื่อ (OP) (EP) ที่ได้มีการสิ้นเปลืองการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยกว่าเยื่อ A (EP)

- ในชั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ชั้น P) ผลจากการทดลองพบว่าเยื่อฟอกแบบ A(EP)P และ (OP)(EP) P ที่ระดับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง จะสิ้นเปลืองการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 23.3 และ 15.3 กิโลกรัมต่อตันเยื่ออบแห้ง ตามลำดับ

4.5.3.3 จากภาพที่ 8 ค่าความขาวสว่างของเยื่อฟอกในแต่ละขั้น A, A(EP), A(EP)P มีค่าเท่ากับร้อยละ 45.4, 63.4 และ 73.9 ตามลำดับ และเยื่อฟอก (OP), (OP)(EP) และ (OP)(EP)P มีค่าเท่ากับร้อยละ 49.3, 65.9 และ 75.3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความขาวสว่างของเยื่อฟอกแบบ (OP)(EP)P สูงกว่าเยื่อฟอกแบบ A(EP)P เท่ากับร้อยละ 1.4 (75.3-73.9) และจากการสอบถามข้อมูลไปยังโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ซึ่งใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษเยื่อฟอกที่ผลิตได้มีค่าความขาวสว่างเท่ากับร้อยละ 73.0 โดยเยื่อฟางข้าวฟอกขาวของโรงงานฯ ผ่านการฟอกในขั้น C-E-H ซึ่งเป็นการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิม ดังนั้นข้อมูลของการศึกษานี้จะสามารถนำไปแนะนำให้ปรับเปลี่ยนขั้นตอนการฟอกได้

4.6 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวแบบไม่ใช้สารคลอรีนกับเยื่อฟอกแบบดั้งเดิมที่ใช้คลอรีนของโรงงาน

4.6.1 เยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวทั้ง 2 แบบ [A(EP)P และ(OP)(EP)P] มาประเมินคุณภาพเพื่อศึกษาสมบัติทางเชิงกลของเยื่อฟอกขาวที่ได้เปรียบเทียบกับเยื่อฟอกแบบดั้งเดิมของโรงงาน ผลการทดลองตามตารางที่ 7 พบว่า ที่ระดับการบดเยื่อเดียวกัน (500 รอบ) เยื่อฟอกแบบ A(EP)P และ(OP)(EP)P มีค่าดัชนีความต้านแรงดึงขาดเท่ากับ 31.2/32.0 กิโลนิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดเท่ากับ 3.16/3.25 นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และ ดัชนีความต้านแรงคั้นทะลุเท่ากับ 2.09/2.14 กิโลพาสคัล- ตารางเมตรต่อกกรัม ตามลำดับ ในทางปฏิบัติถือว่าสมบัติของเยื่อที่ได้ทั้ง 2 แบบ ไม่แตกต่างกันมากนัก

4.6.2 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟอกทั้ง 2 แบบกับเยื่อฟอกของโรงงานจากตารางที่ 7 พบว่าเยื่อ A(EP)P และเยื่อ (OP)(EP)P มีค่าดัชนีความต้านแรงดึงขาดสูงกว่าเยื่อฟอกของโรงงานเท่ากับ 2.1/2.9 (31.2-29.1)/(32.0-29.1) กิโลนิวตัน-เมตรต่อกิโลกรัม ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดสูงกว่าเยื่อของโรงงานเท่ากับ 0.19/0.28 (3.16-2.97) / (3.25-2.97) นิวตัน-ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และดัชนีความต้านแรงคั้นทะลุสูงกว่าเยื่อฟอกของโรงงานเท่ากับ 0.17/ 0.22 (2.09-1.92)/(2.14-1.92) กิโลพาสคัล- ตารางเมตรต่อกกรัม ตามลำดับ จะเห็นว่าเยื่อฟอกทั้ง 2 แบบให้ความแข็งแรงของเส้นใยสูงกว่าเยื่อฟอกของโรงงาน แสดงการฟอกเยื่อฟางข้าวแบบไม่ใช้สารคลอรีนจะสามารถทดแทนการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิมได้โดยที่ให้ความขาวสว่างที่สูงกว่า และในขณะที่เดียวกันความแข็งแรงของเส้นใยก็สูงกว่าด้วย และจากข้อมูลห่อฟอกเยื่อของโรงงานจะเป็นเซรามิกซึ่งสารฟอกเยื่อแบบไม่ใช้สารคลอรีนไม่ว่าจะเป็นขั้นแอซิดหรือขั้นออกซิเจนที่มีเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย สามารถใช้ทดแทนการฟอกได้เลยไม่มีผลกระทบต่อห่อฟอกที่ใช้ และถ้าสามารถเปลี่ยนกระบวนการฟอกมาเป็นแบบไม่ใช้สารคลอรีนแล้วจะเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ศึกษาการผลิตเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ (sulphite process)

ที่ระดับการดัดเยื่อโดยใช้โซเดียมซัลไฟท์ร้อยละ 9 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง จะให้ผลผลิตเยื่อร้อยละ 45.9 ของน้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง และมีค่า kappa number เท่ากับ 15.0

5.2 ศึกษาการฟอกเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์แบบไม่ใช้สารคลอรีน

5.2.1 การฟอกเยื่อซัลไฟท์ฟางข้าวแบบไม่ใช้สารคลอรีนโดยใช้การฟอกเป็นแบบ 3 ขั้นตอน มีรูปแบบการฟอกเป็น A(EP)P และ (OP)(EP)P พบว่าการฟอกแบบ A(EP)P ให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่าการฟอกแบบ (OP)(EP)P โดยการฟอกแบบ A(EP)P และ (OP)(EP)P ให้ผลผลิตเยื่อเท่ากับร้อยละ 93.3 และ 92.1 ตามลำดับ แต่ถือว่าผลผลิตเยื่อที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

5.2.2 เยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวแบบ A(EP)P มีค่าความขาวสว่างร้อยละ 73.9 และเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวแบบ (OP)(EP)P มีค่าความขาวสว่างร้อยละ 75.3

5.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวแบบไม่ใช้สารคลอรีนกับเยื่อฟอกของโรงงาน

เยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวทั้ง 2 แบบ [A(EP)P และ (OP)(EP)P] มีสมบัติของเยื่อไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่เยื่อฟอกแบบ (OP)(EP)P ให้สมบัติของเยื่อสูงกว่าเยื่อฟอกแบบ A(EP)P และเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อฟอกแบบดั้งเดิมของโรงงานแล้วเยื่อฟอกแบบไม่ใช้สารคลอรีนทั้ง 2 แบบให้สมบัติของเยื่อดีกว่าทั้งด้านความขาวสว่างและสมบัติทางเชิงกล

ข้อเสนอแนะ

เยื่อฟางข้าวซัลไฟท์ฟอกขาวทั้ง 2 แบบที่ผลิตได้ สามารถนำไปผลิตกระดาษได้ ถ้าต้องการให้กระดาษมีความขาวสว่างมากขึ้นก็ควรที่จะเลือกกระบวนการฟอกแบบ (OP)(EP) P

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณธิดา เกิดกำไร (ผู้อำนวยการโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม) และ
คุณรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ (ผู้อำนวยการสำนักเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ) ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ
และให้ความรู้ด้านการผลิตเยื่อกระดาษฟางข้าว รวมทั้งการตรวจ / แก้ไข งานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Abbot, J. Catalytic decomposition of alkaline hydrogen peroxide in the presence of metal ions: binuclear complex formation. *Journal of Pulp and Paper Science*, January, 1991, vol.17, no.1, p.10-17
2. Froass, WC., Francis, RC., Dence, CW., and Lefevre, G. The interactions of calcium, magnesium and silicate ions under alkaline conditions. *Journal of Pulp and Paper Science*, July, 1997, vol.23, no.7, p.318-325.
3. Lachenal, D., et al. 1998. Reduction of the formation of AOX during chlorine dioxide bleaching. *Tappi 24 (1) : 15-17*
4. Lindstrom, LA. And Norden, S. 1981. Bleaching of softwood kraft pulp in a short D/C-OD-E sequence. *Tappi 64 (6) : 91-64*
5. Nasman, L. and Annergren, G. 1980. Medium-consistency oxygen bleaching. *Tappi 63 (4) : 105-109*
6. Teder, A. and Tornngren, A. 1995. Reduction of the formation of AOX in DC bleaching By addition of chloride ions. *Journal of Pulp and Paper Science 21 (3) : 86-90*
7. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระดาษ. (เอกสารเผยแพร่) กรมวิทยาศาสตร์บริการ , 2539.
8. สมชาติ รุ่งอินทร์ . ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับงานวิเคราะห์ทดสอบเยื่อและกระดาษ. (เอกสารเผยแพร่) กรมวิทยาศาสตร์บริการ , 2528.

ภาคผนวก

คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์-ทดสอบ

accepts	เยื่อที่คัดผ่านตะแกรงหรือเฮนคริกลินเนอร์
air-dry weight	น้ำหนักวัสดุแห้งเป็นน้ำหนักที่ได้เมื่อวางผึ่งเป็นเวลานานพอสมควรในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิปกติ สำหรับเยื่อกระดาษจะมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10
kappa number	เป็นดัชนีบ่งชี้ปริมาณลิกนินที่เหลือในเยื่อหมายถึง จำนวนกรัมของคลอรีนที่ทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์เยื่อแห้งจำนวน 100 กรัม ในสภาวะที่กำหนดตามมาตรฐาน hypo number มีสหสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกับ klason lignin เฉพาะในช่วงที่ผลิตเยื่อต่ำกว่าร้อยละ 70 เท่านั้น
lignin	เป็น polymer อัดแน่นประกอบด้วย phenyl propane unit เฉลี่ยประมาณ 2500 หน่วย จับตัวกันเป็นโครงร่างข่ายสามมิติด้วย ether bond (ส่วนใหญ่เป็น phenyl-o-aryl bond) และ C-C bond ลิกนินมีความแข็งขั้นสูงที่สุดในส่วนเชื่อมต่อระหว่างเส้นใย (middle lamella) ทำหน้าที่การยึดเส้นใยให้ติดอยู่ด้วยกัน ลิกนินมีคุณสมบัติเป็น thermoplastic อุณหภูมิที่อ่อนตัว (120-2000C) ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น
oven-dry weight	น้ำหนักวัสดุอบแห้ง หมายถึง น้ำหนักเมื่ออบที่อุณหภูมิ 105 C จนกระทั่งน้ำหนักวัสดุไม่ลดลงอีก ในทางปฏิบัติถือว่าหากครั้งต่อไปน้ำหนักลดลงน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักครั้งก่อนก็ใช้ได้
pulp yield, %	ผลผลิตเยื่อที่ได้จากการต้ม ลิกเป็นร้อยละของน้ำหนักวัตถุดิบ
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 ของแผ่นเยื่อหรือกระดาษที่ช่วงคลื่นแสง 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 ฉะนั้นความขาวสว่างจึงเป็นค่าที่มีประโยชน์อย่างยิ่งแต่เฉพาะในการระบุคุณสมบัติของเยื่อฟอกหรืออีกนัยหนึ่ง การวัดผลการฟอกเยื่อเท่านั้นแต่ยังไม่เพียงพอต่อการบ่งบอกความขาว (whiteness) ของกระดาษ การวัดความขาวสว่างขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีหลายแบบแตกต่างกันในด้าน optical geometry เป็นสำคัญ อุปกรณ์วัดความขาวสว่างที่รู้จักกันดีได้แก่ Elerpho, G.E. และ photovolt ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือเหล่านี้แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ไม่สามารถระบุให้ถูกต้องแน่ชัดเป็นเกณฑ์ได้ว่ามากน้อยเพียงใด

brightness reversion	การเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อ ได้แก่ การที่เยื่อมีความขาวสว่างลดลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานการเสื่อมสภาพความขาวเกิดจากปัจจัยทางเคมีในตัวเยื่อเอง และปัจจัยทางกายภาพจากภายนอกเช่น ความชื้นสัมพัทธ์และความร้อน
consistency, percent	<p>ความข้นของน้ำเยื่อคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้งในน้ำเยื่อ</p> $\text{consistency, \%} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100$ <p>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 %)</p>
basis weight	น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่มาตรฐาน มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร เรียกกันว่า กรัม กระดาษ แต่ปัจจุบัน ISO และ TAPPI ใช้คำว่า grammage แทน basis weight โดยทั่วไปหมายถึงน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ที่เก็บรักษาในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ควบคุมมาตรฐานการทดสอบ สำหรับน้ำหนักมาตรฐานที่กำหนดยอมให้ค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อน ได้ร้อยละ 5 ด้านเป็นกระดาษแข็งมีน้ำหนักมาก อาจลดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเหลือเพียงร้อยละ 3
caliper	ความหนาของกระดาษวัดตามสภาวะที่กำหนด โดยใช้ไมโครมิเตอร์ปัจจัยสำคัญในการทดสอบ คือ สวมกดคันที่ใช้ในการวัด ISO และ Scan test ใช้ความกดคัน 100 kPa แต่ใน TAPPI standard ใช้ความกดคันเพียง 50 kPa ความแตกต่างเนื่องจากอุปกรณ์ในกรณีที่กระดาษมีความหนาแน่นค่าจึงอาจเกิดได้มาก วิธีวัดความหนาที่ให้ค่าถูกต้องกว่าคือวิธี integrated mean effective thickness และ mercury pycnometric
moisture content, %	ปริมาณความชื้นในกระดาษ หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีในกระดาษคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักกระดาษในขณะนั้น เช่น น้ำหนักเมื่อได้รับตัวอย่างหรือน้ำหนักภายหลังการเก็บในห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ

มาตรฐานและวิธีทดสอบ

may require the use, disposal, or both, of chemicals present serious health hazards to humans. Procedures handling of such substances are set forth on Material Safety Sheets which must be developed by all manufacturers of potentially hazardous chemicals and maintained by distributors of potentially hazardous chemicals. Prior to the test method, the user should determine whether any of the chemicals to be used are potentially hazardous and, if so, follow strictly the procedures specified by both the manufacturer as well as local, state, and federal authorities for safe use of these chemicals.

The information and data contained in this document were prepared by a technical committee of the Association. The committee and the Association assume no liability or responsibility in connection with the use of such information or data, including but not limited to any liability or responsibility under patent, copyright, or trade secret laws. The user is responsible for determining that this document is the most recent edition published.

Kappa number of pulp

Scope and significance

This method applies to the determination of the relative brightness, bleachability, or degree of delignification of pulp. It may be used for all types and grades of chemical and semichemical, unbleached and semibleached pulps obtained in yields under 60%. This method may also be used for pulps obtained in yields up to 70%, provided the pulp has been well screened. See also Additional Information 10.5.

Definition

The *kappa number* is the volume (in milliliters) of 0.1N potassium permanganate solution consumed by one gram of moisture-free pulp under the conditions specified in this method. The results are corrected to 50% consumption of the permanganate added.

Apparatus

3.1 *Agitator*, of propeller type, made of glass or other noncorrosive material (a plastic or glass-covered magnetic stirrer may be used instead).

3.2 *Disintegration apparatus*, of wet, high-speed type, which disintegrates the pulp completely with a minimum of damage to the fibers. Avoid disintegrators that may contaminate the sample with grease.

3.3 *Constant temperature bath*, capable of maintaining a constant temperature of $25.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ in the reaction vessel.

3.4 *Reaction beaker*, 2000-mL, glass or porcelain.

3.5 *Pipets*, two 100-mL automatic pipets are especially convenient when a large number of determinations are to be made.

3.6 *Buret*, 50-mL, graduated to 0.1 mL. A 52-mL buret will be found more convenient for titrating the reaction mixture in the blank test.

3.7 *Other apparatus*: a Büchner funnel and filter flask to dewater three to four grams of pulp; stopwatch or clock; 1000-mL and a 25- or 50-mL graduated cylinder; 250-mL beaker.

4. Reagents

4.1 *Potassium permanganate solution*, standardized $0.1000 \pm 0.0005\text{N}$ KMnO_4 .

4.2 *Sodium thiosulfate solution*, approximately 0.2N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Normality known with an accuracy of $\pm 0.0005\text{N}$.

4.3 *Potassium iodide solution*, 1.0N KI.

4.4 *Sulfuric acid*, 4.0N H_2SO_4 .

4.5 *Starch indicator solution*, 0.2%.

5. Preparation of sample

5.1 *Air-dried pulp sheets*. Tear small pieces from the sample sheets to weigh a total of three to four grams.

5.2 *Screened slush sheets*. Mix and make three to four grams (dry weight) into a pad by filtering on a Büchner funnel; avoid any loss of fibers. Air-dry the pad and tear it into small pieces.

5.3 *Unscreened pulps*. If the pulp sample is taken from unscreened pulp which is normally screened before bleaching and other processing, then remove the shives and knots from the sample by screening. State method of screening along with the test results and choose the method which would give results similar to those obtained by the industrial screening of the pulp. Proceed as in 5.2.

6. Procedure

6.1 Prior to weighing the test samples, condition them for at least 20 min in the atmosphere near the balance.

6.2 Weigh out to the nearest 0.001 g that amount of pulp specimen which will consume approximately 50% of the potassium permanganate solution. The permanganate consumption must be between 30 and 70%. At the same time weigh out a second specimen and determine its moisture content in accordance with TAPPI T 210 "Sampling and Testing Wood Pulp Shipments for Moisture."

ould duplicate the testing of the specimen as possible (omitting the pulp, of course).

Correction for reaction temperature: When a temperature bath is not available, determine the temperature after the reaction has been taking place for and assume this to be the average reaction temperature throughout the test. If this temperature is not between 30°C nor lower than 20°C, correct the kappa number as follows:

$$K = \frac{Pf}{w} [1 + 0.013 (25 - t)]$$

t = actual reaction temperature in degrees Celsius.

Relationship with lignin. The kappa number is essentially a straight line relationship with both lignin and chlorine number for pulps below 70% pulp yields (1). The percentage of klason lignin approximately equals $K \times 0.13$.

0.6 Aging. Freshly made pulp has a slightly higher permanganate consumption than pulp which has stood several days or months. The change is rather rapid immediately after the pulp is made but reaches a relatively stable stage after two or three days.

0.7 Related methods: APPITA P 201, "Kappa Number of Pulp," Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry, Melbourne, Australia; CPPA G.18, "Kappa Number of

Pulp," Canadian Pulp and Paper Association, Montreal, Canada; ISO R 302, "Determination of the Kappa Number of Pulp (Degree of Delignification)," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; SCAN C1, "Kappa Number of Pulp" (essentially identical), Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, Stockholm, Sweden.

10.8 This method, formerly T 236 os-76, has been reclassified as a Classical Method by the Test Methods Management Committee of the TAPPI Board of Directors. This reclassification was made necessary since the last revision was over five years ago and no revision or reaffirmation has been accomplished by the responsible committee. The method may be reclassified as Official or Provisional when the responsible committee takes proper action according to the "Guidelines for Effective Management, Coordination, Form and Style for TAPPI Test Methods."

Literature cited

1. Tasman, J. E., and Berzins, V., "The Permanganate Consumption of Pulp Materials," *Tappi* 40 (9): 691 (1957); *Pulp Paper Mag. Canada* 58(10): 145 (1957).

Your comments and suggestions on this procedure are earnestly requested and should be sent to the TAPPI Test Methods Administrator. ■

T 403 om-97

OFFICIAL STANDARD - 1926
 TENTATIVE STANDARD - 1952
 OFFICIAL STANDARD - 1974
 CORRECTED - 1979
 OFFICIAL TEST METHOD - 1985
 CORRECTED - 1985
 REVISED - 1991
 REVISED - 1997
 © 1997 TAPPI

The information and data contained in this document were prepared by a technical committee of the Association. The committee and the Association assume no liability or responsibility in connection with the use of such information or data, including but not limited to any liability or responsibility under patent, copyright, or trade secret laws. The user is responsible for determining that this document is the most recent edition published.

Bursting strength of paper

1. Scope

This method is designed to measure the maximum bursting strength of paper and paper products having a bursting strength of 50 kPa up to 1200 kPa (7 psi up to 157 psi) and in the form of flat sheets of up to 0.6 mm (0.025 in.) thick. It is not intended for use in testing corrugated, fiberboard, linerboard, or hardboards that tend to cut the thin rubber diaphragm of the bursting tester. For testing paperboard and linerboard, see TAPPI T 807 "Bursting Strength of Paperboard and Linerboard"; for testing corrugated and solid fiberboard, see TAPPI T 810 "Bursting Strength of Corrugated and Solid Fiberboard."

2. Summary

The test specimen, held between annular clamps, is subjected to an increasing pressure by a rubber diaphragm, which is expanded by hydraulic pressure at a controlled rate, until the test specimen ruptures. The maximum pressure reading up to the rupture point is recorded as the bursting strength.

3. Significance

Bursting strength is widely used as a measure of resistance to rupture in many kinds of paper. The test is relatively easy and inexpensive to make and appears to simulate some end use requirements.

4. Definition

Bursting strength of a material is defined as the maximum hydrostatic pressure required to produce rupture of the material when a controlled and constantly increasing pressure is applied through a rubber diaphragm to a circular area, 30.5 mm (1.20 in.) diameter. The area of the material under test is initially flat and held rigidly at the circumference but is free to bulge during the test.

5. Apparatus

5.1 *Bursting tester*¹, having the following:

5.1.1 A clamp for firmly and uniformly securing the test specimen without slippage during the test. The clamp shall have two annular, grooved, parallel and preferably stainless steel surfaces. The recommended maximum clamping pressure is 1200 kPa. The clamping pressure should be adjustable to accommodate different strength papers without specimen slippage.

5.1.1.1 The upper clamping surface (the clamping ring) has a circular opening 30.50 mm (1.2 in.) \pm 0.05 mm in diameter. To minimize slippage, the surface which is in contact with the paper during testing has either a continuous spiral or concentric V-grooves in the surface. The continuous spiral is a 60° V-groove no less than 0.25 mm (0.010 in.) deep with a pitch of 0.8 mm (1/32 in.). The groove starts 3.2 mm (1/8 in.) \pm 0.1 mm from the edge of the circular opening. The concentric grooves are 60° V-grooves not less than 0.25 mm (0.010 in.) deep and 0.9 mm (1/32 in.) \pm 0.1 mm apart. The innermost groove is 3.2 mm (1/8 in.) \pm 1 mm from the edge of the circular opening. The diameter of the upper clamp should be at least 48 mm.

5.1.1.2 The lower clamping surface (the diaphragm plate) has an opening 33.1 mm (1.302 in.) \pm 0.1 mm in diameter. Its surface has a series of concentric 60° V-grooves 0.30 mm (0.012 in.) deep, 0.8 mm (1/32 in.) apart, the center of the first groove being 3.2 mm (1/8 in.) from the edge of the opening. The thickness of the plate at the opening is 0.66 mm (0.026 in.). The lower edge which is in contact with the rubber diaphragm is rounded to an arc of 6.4 mm (0.25 in.) radius to prevent cutting of the diaphragm when pressure is applied.

5.1.1.3 The clamping ring is connected to a clamping mechanism through a swivel-type joint or other means to ensure an even clamping pressure. During tests, the circular edges of the openings in the two clamping plates are required to be concentric to within 0.25 mm (0.01 in.).

NOTE 1: Because the clamping mechanism and clamping surfaces are subject to considerable wear or distortion, they should be examined periodically and repaired or replaced when necessary.

5.1.2 A circular diaphragm of pure gum rubber free of fillers, 0.85 \pm 0.05 mm (0.034 \pm 0.002 in.) thick. A deadweight micrometer can be used to measure thickness of diaphragm. The diaphragm is clamped between the lower clamping plate and the rest of the apparatus, so that before the diaphragm is stretched by pressure underneath it, the center of its upper surface is below the plane of the clamping surface. The pressure required to raise the free surface of the diaphragm 9 mm (3/8 in.) above the top surface of the diaphragm plate is required to be 30 \pm 5 kPa (4.3 \pm 0.8 psi). In testing this, a bridge gage may be used, the test being carried out with the clamping ring removed. The diaphragm should be inspected frequently for permanent distortion and, if distorted, replaced.

5.1.3 Means of applying controlled, increasing, hydrostatic pressure by a fluid, at the rate of 1.6 mL/s \pm 0.1 mL/s to the underside of the diaphragm until the specimen bursts. The recommended fluid is USP (96%) glycerin. Purified ethylene glycol (not the permanent types of radiator antifreeze with additives) may be substituted if desired.

NOTE 2: The hydraulic system, including the gages or transducers, must be mounted so as to be free from externally induced vibration.

NOTE 3: Because the bursting resistance of paper increases with increased rate of loading, the rate of strain must be maintained effectively constant to obtain reproducible results. Any air present in the hydraulic system of the tester will lower the rate of distortion of the specimen and must be substantially removed. Air is more commonly trapped under the rubber diaphragm and in the tubes of the gages. A simple method of testing for the presence of excessive quantities of air is given in 6.3.

5.1.4 A maximum-reading pressure gage of the Bourdon type, of appropriate capacity and with a graduated circular scale 95 mm (3 3/4 in.) or more in diameter. Pressure sensitive electronic gages as described in 5.1.5 are widely replacing the Bourdon type gages.

5.1.4.1 The choice and characteristics of the Bourdon gage are given in Table 1. The 0-840 kPa (0-120 psi) range gage may be used for any test within its capacity, if so noted in the report. The Bourdon gage should have an accuracy of \pm 1% of reading.

¹Names of suppliers of testing equipment and materials for this method may be found on the Test Equipment Suppliers list in the bound set of TAPPI Test Methods, or may be available from the TAPPI Technical Operations Department.

Table 1. Bourdon Gage characteristics.

Range of bursting pressure		Range of gage		Scale graduation intervals		Expansibility of gage	
kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	mL/kPa	mL/psi
28-77	4-11	0-105	0-15	0.7	0.1
55-161	8-23	0-210	0-30	1.5	0.2	0.080	0.011
105-315	15-45	0-420	0-60	3.5	0.5	0.050	0.007
210-630	30-90	0-840	0-120	3.5	0.5	0.030	0.004
525-1575	75-225	0-2100	0-300	14.0	2.0	0.007	0.001

5.1.4.2 The expansibility of a gage is the volume of liquid entering the gage tube per unit increase in pressure, when air is absent. It can be determined most conveniently by means of a dilatometer device described by Tuck and Mason (1). The gage expansibility must be within 15% of the specified value.

NOTE 4: An appreciable flow of liquid into the gage occurs from the start of the test to the instant of burst. A gage therefore reduces the rate of distension of the specimen by an amount depending upon its expansibility. When a number of gages are mounted on a single apparatus, care must be taken that only the gage on which the measurement is being made is open to the hydraulic system; otherwise an erroneously low burst pressure will be recorded.

5.1.4.3 To avoid overloading and possible damage to the gage, a preliminary bursting test should be made with a high-capacity gage.

5.1.5 Pressure sensitive electronic gages are today widely replacing the Bourdon type gages. The advantage is that one sensor normally can handle the entire measuring range.

5.1.5.1 These pressure transducers must have at least an accuracy of 1% of measurement or ± 10 kPa (1.5 psi) whichever provides the greater accuracy.

5.1.5.2 To avoid overloading and possibly damaging the transducer, a preliminary bursting test should be made with a high-capacity transducer.

NOTE 5: When using a pressure transducer, the results may be lower than an instrument using a Bourdon gage due to the expansibility of the Bourdon gage which does not occur with the pressure transducer.

6. Calibration and maintenance

6.1 The pressure indicating device shall be calibrated by means of a dead-weight tester of the piston type. If the device is a Bourdon-type gage, it must be calibrated while inclined at the same angle at which it is to be used. Preferably, the calibration is to be carried out with the gage in its normal position. For an instrument error of less than 3%, the pressure indicating device shall be calibrated in such a manner that known pressures are applied dynamically at approximately the same rate as in testing of paper. Maximum reading pressure devices are subject to dynamic errors as well as ordinary static calibration errors. A suitable method of dynamic calibration for greater precision is described by Tuck *et al.* (2).

6.1.1 Gages in frequent use should be calibrated at least once a month. If a gage is accidentally used beyond its capacity, it must be recalibrated before it is used again.

6.2 Calibration of transducer / readout system. The transducer can be calibrated on the same device as used to calibrate gages, or as per manufacturer's recommendations.

6.2.1 Transducers in frequent use should be calibrated at least once a month.

6.3 Check for air in system. Any time that maintenance is carried out on the apparatus that could allow air to enter the hydraulic system, steps should be taken to ensure that all of the air has been removed.

6.3.1 To determine if there is air in the system, first apply pressure as described in 5.1.2 to raise the diaphragm 9 mm (3/8 in.) above the top of the diaphragm plate and hold for one minute. Any air trapped between the diaphragm and the fluid will show up as a white spot under the surface of the diaphragm. If this occurs, the diaphragm must be reinstalled.

6.3.2 After changing the diaphragm, if it is necessary to purge air from the rest of the hydraulic system. See the manufacturer's operation manual for instructions.

6.4 *Check condition of clamping surfaces.* The samples should be checked frequently for any indentions, wrinkles or marks that may indicate the clamping surfaces are in poor condition. The clamps themselves can be visually examined for excessive wear that could affect clamping pressure. Carbon paper between two sheets of paper can be used to check for uniform clamping pressure.

7. Sampling and test specimens

If the paper is being tested to evaluate a lot of paper, obtain a sample in accordance with TAPPI T 400 "Sampling and Accepting a Single Lot of Paper, Paperboard, Containerboard, or Related Product." From each test unit take 20 specimens, each at least 62 x 62 mm (2.5 x 2.5 in.). Avoid areas including watermarks, creases, or visible damage. Identify the wire side of the specimens (see TAPPI T 455 "Identification of Wire Side of Paper").

8. Conditioning

Condition and test the specimens in an atmosphere in accordance with TAPPI T 402 "Standard Conditioning and Testing Atmospheres for Paper, Board, Pulp Handsheets, and Related Products."

9. Procedure

9.1 Clamp a specimen securely in position, overlapping the specimen at all points. Apply the hydrostatic pressure as specified until the specimen ruptures, and record the maximum pressure registered. Watch carefully for any movement of the unclamped margin of the specimen. If slippage is indicated, discard the test and increase the clamping pressure. If it appears that excessive clamping pressure damaged the specimen, discard the test and reduce the clamping pressure.

9.2 After each test return the pressure indicator gently to zero.

9.3 Make ten tests on each side of the paper.

10. Report

10.1 For each side of the paper, report the bursting strength in kilopascals (or pounds per square in.) as the arithmetical mean, corrected for any gage error, to three significant figures. Include the number of tests and either the standard deviation or, alternatively, the maximum and minimum values of accepted tests.

10.2 If desired, the burst index (bursting strength per grammage) may be reported. It may be calculated as follows:

$$X = \frac{P}{W}$$

where

X = burst index, $\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$

P = bursting strength, kPa

W = weight per unit area, g/m^2 , as determined in accordance with TAPPI T 410 "Grammage of Paper and Paperboard."

10.3 The term "points" is frequently used in place of pounds per square inch as an expression for bursting strength of paper. The results may be so reported if desired.

11. Precision

11.1 Repeatability (within a laboratory) = 22%.

11.2 Reproducibility (between laboratories) = 28%; in accordance with definitions of these terms in TAPPI T 1206 "Precision Statement for Test Methods."

11.3 Collaborative Testing Service data for the 1994 - 1995 program year indicates bursting strength data as follows (partial listing by range):

Table 2. Bursting Strength Data

Paper Type	# of Labs (average)	Materials	Grand Mean (range), PSI	Repeatability (r), PSI	%r	Reproducibility (R), PSI	%R
Newsprint	13	16	10.62 (9.2 - 12.4)	2.67	25.1%	3.20	30.1%
Printing Papers	93	16	29.8 (19.9 - 40.3)	6.47	22.2%	8.40	28.9%
Packaging Papers	64	16	54.3 (41.4 - 74.2)	10.42	19.4%	14.22	26.4%

Taken from Collaborative Testing Services Paper and Paperboard Program Report Nos. 152 through 159 from 1994 and 1995 reflecting Analyses 304 (Newsprint), 305 (Printing Papers) and 310 (Packaging Papers).

The user of these precision data is advised that it is based on actual mill testing, laboratory testing, or both. There is no knowledge of the exact degree to which personnel skills or equipment were optimized during its generation. The precision quoted provides an estimate of typical variation in test results which may be encountered when this method is routinely used by two or more parties.

12. Keywords

Burst strength, paper, burst index.

13. Additional information

13.1 Effective date of issue: November 16, 1997.

13.2 For checking purposes, bursting tests on aluminum foil may be used. Standardized foils for pressure up to about 800 kPa (about 115 psi) may be obtained from several sources.

13.3 Terms used to express burst include:

$$\text{Burst index} = \frac{\text{burst, kPa}}{\text{grammage, g/m}^2}$$

$$\text{Burst ratio} = \frac{\text{burst, psi}}{\text{basis weight, lb/ream}}$$

$$\text{Burst factor} = \frac{\text{burst, g/cm}^2}{\text{grammage, g/m}^2 \text{ (usually oven dry)}}$$

Burst ratio is sometimes called "points per pound."

13.4 Related methods: ASTM D 774 "Standard Test Method for Bursting Strength of Paper;" Australian, APPITA P 403; Brazilian, ABCP P8; British, BS 3137; Canadian Tech. Sect., CPPA Standard D.8; French, AFNOR 003-014; International Organization for Standardization, ISO 2758 "Paper Determination of Bursting Strength"; Scandinavian, SCAN P24 "Paper Burst Strength."

13.5 Methods for evaluation of pumping rate and presence of air in the system/gage expansion specifications can be found in SCAN P24 "Paper Burst Strength."

6

References

1. Tuck, N. G. M., and Mason, S. G., "Some Factors Influencing the Accuracy of Mullen Testers," *Pulp Paper Mag. Canada* 50 (11): 132 (1949).
2. Tuck, N. G. M., Faichney, L. M., and Mason, S. G., "The Dynamic Calibration of Maximum-Reading Pressure Gages," *Pulp Paper Mag. Canada* 54 (5): 102 (1953).

Your comments and suggestions on this procedure are earnestly requested and should be sent to the TAPPI Technical Operations Manager. ■

The information and data contained in this document were prepared by a technical committee of the Association. The committee and the Association assume no liability or responsibility in connection with the use of such information or data, including but not limited to any liability or responsibility under patent, copyright, or trade secret laws. The user is responsible for determining that this document is the most recent edition published.

Tensile breaking strength and elongation of paper and paperboard (using pendulum-type tester)

1. Scope

1.1 This method describes a procedure, using pendulum-type equipment, for determining two tensile breaking properties of paper and paperboard, namely, the force per unit width required to break a specimen (tensile strength) and the percentage elongation at break (elongation) (1).

1.2 This procedure is applicable to all types of paper and board (excluding corrugated board) within the limitations of the instruments used. This procedure is not suitable for the determination of the elastic properties of paper and paperboard.

1.3 TAPPI T 494 "Tensile Breaking Properties of Paper and Paperboard (Using Constant Rate of Elongation Apparatus)" describes a procedure for determining the same properties using constant rate of elongation equipment. Because of inherent differences in the manner in which tensile force is increased, the two methods may not produce the same results on the same sample material.

1.4 For wet tensile strength, see TAPPI T 456 "Wet Tensile Breaking Strength of Paper and Paperboard."

2. Significance

2.1 Tensile strength is indicative of the serviceability of many papers, such as web printing, wrapping, bag and gummed tape, and creped papers, such as cable wrapping, tissue, and toweling, which are subjected to direct tensile forces.

2.2 Elongation, with bending stiffness, is indicative of the ability of paper to conform to a desired contour and therefore is important for creped papers, towels, flexible

packaging papers, and corrugating medium.

3. Definitions

3.1 *Tensile strength*, the maximum tensile force per unit width developed in a test specimen at rupture or break under prescribed conditions.

3.2 *Elongation*, the tensile strain developed in the test specimen at maximum tensile strength before rupture under prescribed conditions. The strain is expressed as a percentage, i.e., one hundred times the ratio of the increase in length of the test specimen to the original test span.

4. Apparatus

4.1 *Tensile testing machine*¹, meeting the following requirements:

4.1.1 Means of applying an increasing load to the specimen until it breaks, the increase being such that the additional load applied each second is not different by more than 5% from the additional load applied in the previous second.

4.1.2 Means of indicating the loading force at the instant of test specimen break, readable to within 1%.

4.1.3 Means of indicating the elongation of the test specimen up to the instant of complete break within 0.5 mm (0.02 in.).

4.1.4 Two clamping jaws, each with a line contact

¹Names of suppliers of testing equipment and materials for this method may be found on the Test Equipment Suppliers list in the bound set of TAPPI Test Methods, or may be available from the TAPPI Information Resources Center.

for gripping the specimen, with the line of contact perpendicular to the direction of the applied load and with a means for adjusting the clamping pressure. The clamping surfaces of the two jaws should be in the same plane and so aligned that they hold the test specimen in that plane throughout the test.

NOTE 1: "Line contact" describes the clamping zone resulting from gripping the specimen between a cylindrical and a flat surface or between two cylindrical surfaces whose axis are parallel (2).

NOTE 2: Flat clamping surfaces may be used if only tensile strength is to be measured. Problems with slippage may occur and yield misleading elongation measurements.

4.1.5 Means for setting the distance between the two pairs of clamps to 180 ± 0.5 mm at the start of a test. (See Note 4 for special cases when a shorter distance may be used.)

4.2 Specimen cutter, for cutting specimens of the required width, with straight parallel sides. Poorly cut edges will give abnormal test results.

5. Preparation and calibration of apparatus

5.1 Preparation

5.1.1 Maintenance of testing machine. Regularly inspect the machine for cleanliness and damage. Clean the machine and rectify any faults according to instrument maker's instructions.

5.1.2 Adjustment of testing machine. Level the machine accurately in its two principal directions. Align the clamping jaws to hold the specimen in the plane of the applied load throughout the test.

5.1.2.1 Position the jaws so that the test span is as specified (4.1.5). Verify by measuring the resulting test span, e.g. by measuring the distance between centers of the line clamp impressions produced on strips of thin foil.

5.1.2.2 Determine the appropriate clamping pressure so that neither slippage nor specimen damage occurs (see Appendix A1).

5.2 Calibration of testing machine

5.2.1 Calibrate the load measuring mechanism with standard weights by the dead-weight loading method; i.e., obtain readings at about ten points evenly spaced throughout the scale, by applying known weights with increasing increments to the clamp actuating the indicating or recording mechanism. If the readings differ from the corresponding applied loads by more than 0.5%, construct a correction curve of scale reading vs actual applied load.

5.2.2 When calibrating the pendulum type of tester, determine the effect of the friction of the pawls as follows: (a) with the pawls engaged as in normal use, allow the calibration weight to exert its force by gently lowering

it by hand at a speed somewhat slower than that used in an actual test; (b) with pawls wedged up with a small piece of paper bent double, gently apply the same calibration weight and allow the pendulum to come to equilibrium. If the reading by (a) is less than by (b), then the friction of the pawls is more important; therefore, reduce the friction as much as possible by oiling or other means. If the reading by (a) remains less than the reading by (b), calibrate the scale by method (a). If the reading by (a) is greater than by (b), the friction is less significant than the inertia; therefore calibrate by method (b).

5.2.3 Calibrate the extension measuring mechanism with inside vernier calipers over the entire load range of interest. Construct a correction curve relating the movement of the clamps and the corresponding movement of the extension measuring mechanism (see Appendix A5).

6. Sampling and test specimens

6.1 Obtain a sample of the paper in accordance with TAPPI T 400 "Sampling and Accepting a Single Lot of Paper, Paperboard, Containerboard or Related Product."

6.2 Precondition, then condition the sample in an atmosphere as specified in TAPPI T 402 "Standard Conditioning and Testing Atmospheres for Paper, Board, Pulp Handsheets and Related Products," prior to cutting the specimens.

NOTE 3: The exposure of paper to high relative humidity before preconditioning and conditioning can lead to a substantial increase in elongation (3). Careful protection of the sample from the time of sampling until testing is very important.

6.3 From each test unit of the sample, cut 10 test specimens in each principal direction of the paper 25.4 ± 1 mm (1.00 ± 0.04 in.) wide with the sides parallel within 0.1 mm (0.004 in.) and long enough to be clamped in the jaws when they are 180 mm (approximately 7 in.) apart, leaving enough length so that any slack can be removed from the strip before clamping. Ensure that strips are free from watermarks, abnormalities, cut edges, creases or wrinkles (see Appendixes A2 and A4).

NOTE 4: Some product dimensions (e.g., toilet tissue) are less than the required test length of 180 mm. In those cases, use the longest test length that can be achieved and record the length used in the report.

7. Procedure

7.1 Perform the test in a testing atmosphere as specified in TAPPI T 402. "Standard Conditioning and Testing Atmosphere for Paper, Board, Pulp Handsheets, and Related Products."

7.2 Align and clamp the specimen first in the upper jaw, and, after carefully removing any noticeable slack, in the lower jaw; preload the specimen if required. The proper paper alignment in the clamps will prevent jaw tear type breaks. Avoid touching with the fingers the test area between the clamps (see Appendix A2).

7.3 Load each specimen in the following manner until it breaks, by adjusting the machine speed so that the average time to break is between 5 and 15 s. The time can be extended to 30 s when testing high elongation papers such as crepe and extensible papers (see Appendix A3).

NOTE 5: In cases of dispute, the average time to break should be 10 ± 2 s.

7.3.1 Reject readings from individual strips if the strip slips or breaks in or at the edge of the clamps.

8. Report

8.1 For each test unit and in each direction, report to three significant figures:

8.1.1 The average MD and CD tensile strength and standard deviation in kilonewtons per meter (kN/m) and (if desired) in pounds per inch (lbf/in.).

8.1.1.1 Additional conversions: 1 kN/m equals 5.71 lbf/in. and 1 kN/m equals 1.02 kgf/cm.

8.1.2 The average MD and CD elongation and standard deviation as a percentage.

8.2 The average time to break for MD and CD tests separately.

8.3 Report the number of tests rejected and the reason for rejection.

8.4 Report any deviation in test procedure, as when a short specimen must be used.

NOTE 6: The tensile strength of pulp handsheets is usually calculated as breaking length and/or tensile index (see TAPPI T 220 "Physical Testing of Pulp Handsheets").

NOTE 7: Some grades of paperboard require that tensile stress be reported. Tensile stress (kN/m² or psi) is obtained by dividing tensile strength by specimen thickness.

9. Precision

9.1 Repeatability (within laboratory): 4.1% (tensile strength); 10.2 (elongation).

9.2 Reproducibility (between laboratories): 12.8% (tensile strength); 28.5 (elongation).

9.3 Comparability (between materials): 7.1% (tensile strength); 19.6 (elongation).

9.4 These values are based on data in Reports 25 through 70 of the TAPPI CRP. Tensile strength precision is based on data from 42 laboratories and 5 different materials. Elongation precision is based on data from 12

laboratories and 4 different materials.

The reader should be cautioned that this analysis is based on actual mill/laboratory tensile testing with instruments or procedures that may not conform with this method. This information is provided as a guide as to the potential variation in tensile strength evaluation that may exist across the industry.

10. Additional information

10.1 Effective date of issue: June 8, 1992.

10.2 Related methods: TAPPI T 494 "Tensile Breaking Properties of Paper and Paperboard (Using Constant Rate of Elongation Apparatus)"; APPITA P 425 "Tensile Strength of Shipping Sack Paper (25.4 mm Width)," P 404 "Tensile Strength of Paper and Paperboard (15 mm Width)," Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry, Parkville, Australia; AFNOR 003-001, Association Francaise de Normalisation, Paris, France; ASTM D 828 "Tensile Breaking Strength of Paper and Paperboard," American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA; BS 4415, British Paper and Board Makers' Association, Kenley, England; CPPA D-6H, "Tensile Breaking Strength of Paper and Paperboard," Canadian Pulp and Paper Association, Montreal, Canada; ISO 1924, "Paper and Board Determination of Tensile Strength," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; SCANP 16, "Tensile Strength and Stretch of Paper and Paperboard Determined with a Pendulum Tester," Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, Stockholm, Sweden; VZPCI, V12, Zellcheming, Germany.

10.3 Except as noted, most of the above methods specify a preferred specimen width of 15 mm.

Appendix

A.1 Clamping pressure

A.1.1 Flat clamping jaws do not present a problem when performing only tensile tests. Some slippage is allowable provided the break does not occur at clamp line; however, there can be no slippage when elongation determinations are made.

NOTE A1: Papers prepared from the more highly hydrated or beaten stocks, such as tracing paper and glassine, present the most difficult gripping problem. Thus, it is recommended that the clamping pressure be adjusted by making a test with a strong tracing paper. The clamping pressure adjusted to give satisfactory results with this tracing paper will be suitable for the testing of a fairly wide variety of papers in the intermediate weight and strength range. The use of excessively high pressures is shown by straight-line breaks in, and immediately adjacent to, the clamping zone, whereas the use of too low a pressure

shows an abrupt discontinuity in the load-elongation curve or failure of the specimen beyond the clamped zone, or, following the test, a wider-than-normal impression of the clamping line.

A.2 Initial loading

A.2.1 *General.* The initial load on the strips specified in the procedure is to remove any cockles or waviness which might be present. With most papers this small initial load will not cause any sensible extension beyond removing the defects mentioned. The value of the initial tension is not critical for flat papers; hence, except for very precise work, it is sufficient to remove the waviness or cockles by application of a slight tension to the strip with the fingers before tightening the clamp.

A.2.1.1 *Crepe paper.* In testing creped paper, follow the procedure in A.2.1 except, if necessary, reduce the length of the specimen to enable the elongation to be within the range of the indicating mechanism, and apply no more initial tension to the test strip before clamping than is required to straighten it (see A 4).

A.2.2 *Preloading.* Tightly grip one end of each strip in the upper clamp after placing the strip loosely in the lower clamp and checking its alignment. Then apply an initial force of 2.2 N (0.5 lbf) to each strip before clamping, except for papers too weak to withstand the force.

A.2.2.1 In the latter case, subject two or three test specimens from the same sample of paper to a preliminary tensile test and apply an initial tension equal to $10 \pm 2.5\%$ of the average break load so determined to each strip while being clamped. With apparatus in which the test specimen is clamped vertically, this is conveniently done by temporarily clipping a suitable weight to the lower protruding end of the strip, before tightening the lower clamp. Tightly clamp both ends of the strip and apply the load.

A.3 The elongation test for some papers is not appreciably influenced by the rate of loading, while for others, especially creped papers, doubling the rate of loading may increase the result by as much as 5% of the recorded amount.

A.4 *Specimen length.* If a smaller distance between the clamps is employed, a greater elongation value may be expected, since the elongation after the initial fracture has been made is appreciable and is independent of the length of the strip used. Like the tensile breaking strength test, the effect of the length of strip on the elongation is also somewhat dependent upon the formation of the sheet. In addition, the accurate indication of elongation for strips much less than 180 mm is open to question unless unusually good apparatus is employed. Varying the width of the test specimen between 12 mm and 25 mm, with a proportionate rate of loading, does not in general make much difference in the test results, except for unbeaten long-fibered papers, where the differences may be appreciable, perhaps 10% of the recorded amount.

A.5 For precise work or for papers having a relatively low stretch (less than 2%), the stretch attachment to the usual pendulum tester is not very accurate, because of deficiencies in the release mechanism. Instruments of the constant rate of elongation (CRE) type with electronic amplification and recording are better.

References

1. Instrumentation Studies-Report No. 36, "The Measurement of the Stretch of Paper," New York, American Paper and Pulp Association (Feb. 10, 1942).
2. Wink, W. A., Hardacker, K. W., and Van Eperen, R. H., "The Effect of Initial Span on the Measured Tensile Properties of Paper," *Tappi* 47 (1): 47(1964).
3. Wink, W. A., "The Effect of Relative Humidity and Temperature on Paper Properties," *Tappi* 44 (6): 171A(1961).

Your comments and suggestions on this procedure are earnestly requested and should be sent to the TAPPI Technical Divisions Administrator. ■

A.3 The elongation test for some papers is not appreciably influenced by the rate of loading, while for others, especially creped papers, doubling the rate of loading may increase the result by as much as 5% of the recorded amount.

A.4 *Specimen length.* If a smaller distance between the clamps is employed, a greater elongation value may be expected, since the elongation after the initial fracture has been made is appreciable and is independent of the length of the strip used. Like the tensile breaking strength test, the effect of the length of strip on the elongation is also somewhat dependent upon the formation of the sheet. In addition, the accurate indication of elongation for strips much less than 180 mm is open to question unless unusually good apparatus is employed. Varying the width of the test specimen between 12 mm and 25 mm, with a proportionate rate of loading, does not in general make much difference in the test results, except for unbeaten long-fibered papers, where the differences may be appreciable, perhaps 10% of the recorded amount.

A.5 For precise work or for papers having a relatively low stretch (less than 2%), the stretch attachment to the usual pendulum tester is not very accurate, because of deficiencies in the release mechanism. Instruments of the constant rate of elongation (CRE) type with electronic amplification and recording are better.

References

- 1. Instrumentation Studies-Report No. 36, "The Measurement of the Stretch of Paper," New York, American Paper and Pulp Association (Feb. 10, 1942).
- 2. Wink, W. A., Hardacker, K. W., and Van Eperen, R. H., "The Effect of Initial Span on the Measured Tensile Properties of Paper," *Tappi* 47 (1): 47(1964).
- 3. Wink, W. A., "The Effect of Relative Humidity and Temperature on Paper Properties," *Tappi* 44 (6): 171A(1961).

Your comments and suggestions on this procedure are earnestly requested and should be sent to the TAPPI Technical Divisions Administrator. ■



This TAPPI Test Method has been adopted
and endorsed by the Tag and Label
Manufacturers Institute, Inc. (TLM)

T 414 om-98

OFFICIAL STANDARD - 1928
TENTATIVE STANDARD - 1964
OFFICIAL TEST METHOD - 1982
REVISED - 1988
WITHDRAWN - 1997
REINSTATED (OFFICIAL METHOD) - 1998
© 1998 TAPPI

The information and data contained in this document were prepared by a technical committee of the Association. The committee and the Association assume no liability or responsibility in connection with the use of such information or data, including but not limited to any liability or responsibility under patent, copyright, or trade secret laws. The user is responsible for determining that this document is the most recent edition published.

Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method)

1. Scope

1.1 This method measures the force perpendicular to the plane of the paper required to tear multiple plies through a specified distance after the tear has been started using an Elmendorf-type tearing tester. The measured results can be used to calculate the approximate tearing resistance of a single sheet. It is not suitable for single-ply tear testing; a separate method for single-ply tear will be available.

1.2 It is not suitable for determining the cross-directional tearing resistance of highly directional boards and papers. These materials are covered by TAPPI T 496 "Cross Directional Internal Tearing Resistance of Paperboard."

1.3 For edge-tear resistance see TAPPI T 470 "Edge Tearing Resistance of Paper (Finch Method)."

2. Summary

More than one sheet of the sample material are torn together through a fixed distance by means of the pendulum of an Elmendorf-type tearing tester. The work done in tearing is measured by the loss in potential energy of the pendulum. The instrument scale is calibrated to indicate the average force exerted when a certain number of plies are torn together (work done divided by the total distance torn).

3. Significant test variables

3.1 Several Elmendorf-type tearing testers are available and in use throughout the world, principally those of Australian, British, German, Swedish, and United States manufacture. In addition, testing practices also vary, as is reflected in the related methods for these countries or others listed in 11.3. Instruments and practices in use vary in at least three major respects:

3.1.1 One difference is in the design of the pendulum sector. The oldest model without deep cutout permitted the specimen to come in contact with the sector during the test and gave values significantly higher than those obtained using the newer models with a deep cutout (see Fig. 1) which eliminate this undesirable friction. The magnitude of the difference in value obtained using different styles of the instrument described in this test method varies as a function of instrument and with different types and grammages of paper. The instrument having the oldest-style sector does not meet the requirements of this test method. With a few materials, test values have been observed (1) to be as much as 10% greater with the oldest-style sector.

3.1.2 The second difference is in the design of the specimen clamps which, together with the structural characteristics of the paper which govern the nature of the tear with respect to its splitting tendencies during the test, can

Approved by the Physical Properties Committee of the Process and Product Quality Division
TAPPI

have an appreciable influence on the mode of tearing and may result in significant differences (2). The procedure described in Section 7.3 reduces this effect. The clamp designs used by some manufacturers may vary even for their own models. Instruments are available with pneumatically activated grips as well; their use minimizes variations due to differences in clamping pressures exerted by manually tightened grips.

3.1.3 The third difference results from a combined variation in testers and testing practices. As measured tearing resistance increases or decreases for different types of paper, it may become so large or so small as to be outside the practical range of the instrument. This problem may be overcome by changing the number of plies tested at one time. The tearing length must never be varied in an effort to alter the pendulum capacity.

3.2 The foregoing, together with other lesser differences in design details between instruments or testing practices, preclude specifying a tearing instrument and method that would give essentially the same test results when using Elmendorf instruments of different design and manufacture. Even for one specific model, some procedural variables such as the number of plies torn may alter the test values calculated on a single sheet basis substantially. Hence, by necessity, this reference method must be arbitrary and is limited to the described procedure used with instruments conforming to all of the requirements specified under Section 4.

4. Apparatus.

4.1 Elmendorf tearing tester (3-5), with a cut-out as shown in Fig. 1, which prevents the specimen from coming in contact with the pendulum sector during the test, and having the following elements:

4.1.1 A stationary clamp; a movable clamp carried on a pendulum formed by a sector of a circle free to swing on a ball bearing; a knife mounted on a stationary post for starting the tear; means for leveling the instrument; means for holding the pendulum in a raised position and for releasing it instantaneously; and means for registering the maximum arc through which the pendulum swings when released.

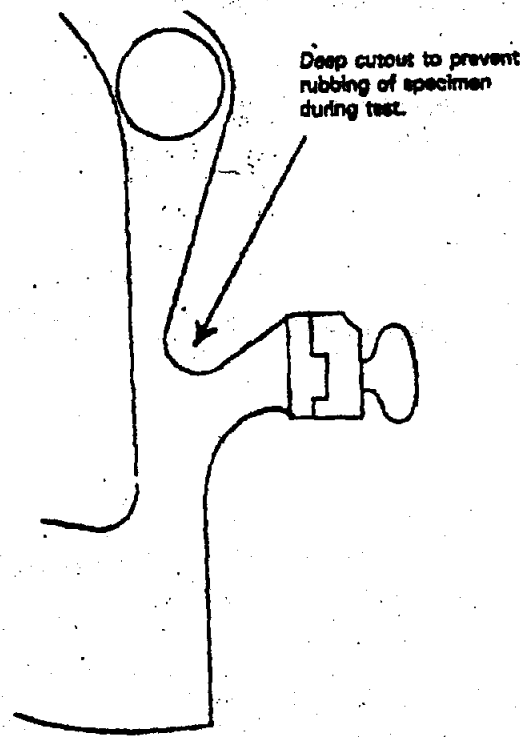


Fig. 1. Newer testing model with deep cutout.

4.1.1.1 The registering means may consist of a graduated scale mounted on the pendulum, a pointer mounted on the same axis as the pendulum with constant friction just sufficient to stop the pointer at the highest point reached by the swing of the sector, and an adjustable pointer stop for setting the zero of the instrument.

4.1.1.2 The pointer and scale may be replaced by a digital readout unit which gives readings of equivalent accuracy and precision (σ).

4.1.2 With the pendulum in its initial position ready for a test, the clamps are separated by an interval of 2.8

± 0.3 mm and are so aligned that the specimen clamped in them lies in a plane parallel to the axis of the pendulum, the plane making an angle of $27.5 \pm 0.5^\circ$ with the perpendicular line joining the axis and the horizontal line formed by the top edges of the clamping jaws. The distance between the axis and the top edges of the clamping jaws is 103.0 ± 0.1 mm. The clamping surface in each jaw is at least 25 mm wide and 15.9 ± 0.1 mm deep.

NOTE 1:

In the past, it has been the practice for instruments commonly available in the United States to be equipped with 36 ± 1 mm wide jaws. Instruments currently available, however, may be equipped with jaws as narrow as 25 mm. Testing has shown that the effect of jaw width on test results is statistically insignificant. It is recommended, however, that the test specimen length be adjusted to match jaw width. See Note 4.

4.1.3 The instrument measures the energy (work done) used by the pendulum in tearing the test specimen. In order to convert to average tearing force, the energy must be divided by the total distance through which the force is applied. This division may be accomplished by the electronics in digital read-out instruments so that the read-out is directly in grams-force or in millinewtons (SI unit of force). For pointer and scale instruments, the scale may in millinewtons or in grams-force for a specified number of plies; i.e., when the specified number of plies are torn together, the scale reading gives the average tearing resistance (force) of a single ply.

4.1.4 Instruments of several capacities e.g., about 2000, 4000, 8000, 16,000, 32,000 mN (200, 400, 800, 1600, 3200 gf) and perhaps others are available, with the several capacities being achieved by individual instruments, interchangeable pendulum sectors, or augmenting weights. The instrument recognized as "standard" for this method has a capacity of 1600 gf (SI equivalent 15.7 N); i.e., it has a pendulum sector of such mass and mass distribution that its 0 to 100 scale is direct reading in grams-force per ply when 16 plies are torn together. For a 16-ply test specimen, the tearing distance $K = 16 \times 4.3$ cm (tearing distance per ply) $\times 2 = 137.6$ cm, the factor 2 being included since in tearing a given length the force is applied twice the distance. Likewise, for a 16-ply test specimen, the tearing energy per ply for a scale reading of 100 would then be 100 gf \times 137.6 cm or 13760 gf cm (SI equivalent 1349.4 mJ). For some of the instruments of different capacities where different numbers of plies are required, or when the number of plies tested using the "standard" instrument differs from 16, different values of K and/or the tearing energy per ply may be calculated, using the above calculation as a model.

4.1.5 In the "standard" instrument, the zero reading on the scale is at about 70° from the center line (i.e., the vertical balance line when the pendulum hangs freely), the 100 reading is at about 21° from the center line, and a vertical force of 1057.3 ± 2.0 gf (SI equivalent 10.369 ± 0.020 N) applied at 22.000 ± 0.005 cm from the pendulum axis is required to hold the pendulum sector at 90° from its freely hanging position to give a total capacity at 1600 gf ± 6.4 gf.

4.1.6 The cutting knife for the test specimen is centered between the clamps and adjusted in height so that the tearing distance is 43.0 ± 0.2 mm; i.e., the distance between the end of the slit made by the knife and the upper edge of the specimen is 43.0 ± 0.2 mm when the lower edge of the 63.0-mm wide specimen rests against the bottom of the clamp.

4.2 *Specimen cutter.* To insure parallel specimens 63.0 ± 0.15 -mm wide with sharp and clean edges, it is desirable to use the type having two hardened and ground base shears, twin knives tensioned against the base shears, and a hold-down mechanism.

5. Calibration and adjustment

5.1 Verification of scale

5.1.1 Once the scale has been verified, it is unnecessary to repeat this step, provided the tester is kept in adjustment and no parts become changed or perceptibly worn. The scale may be verified either by the potential energy method or by the method which uses the check weights obtainable from the manufacturer. The potential energy method is relatively time-consuming and complicated. The check weight method is relatively simple.

5.1.2 *Potential energy method.* The procedure (7) for verification is as follows: Anchor and level the tester as later described. Clamp a known weight (in grams) W to the radial edge of the sector beneath the jaws, the center of gravity of the weight (including means of attaching) having been previously marked by a punched dot on the face of the weight that is to be toward the front of the instrument. Close the jaw of the clamp in the sector. Raise and set the sector as for tearing a sheet and, by means of a surface gauge or cathetometer, measure in centimeters, to the nearest 0.01 cm, the height H of the center of gravity of the weight above a fixed horizontal surface. Then release the sector, allow it to swing and note the pointer reading. Without touching the pointer, raise the sector until the edge of the pointer just meets with its stop, in which position again determine the height h of the center of gravity of the weight above the fixed surface.

5.1.2.1 The work done is $W(h-H)$ gf cm. For the standard 1600 gf tester, the pointer reading should be $W(h-H)/K$, where $K = 137.6$ cm. For other instruments graduated for grams-force of greater or lesser capacity, the reading will be factors of 2 greater or smaller. If graduated for millinewtons, the additional factor 9.81 must be applied.

5.1.2.2 One or more weights may be clamped on the edge of the sector for each calibration point, the work done in raising each weight being calculated and added together.

5.1.2.3 If the deviations of the indicated readings are greater than one-half division, the instrument should be returned to the manufacturer for repair and adjustment.

5.1.2.4 Calibration weights may or may not be available from the manufacturer of the instrument for use in calibration.

5.1.3 *Verification of Scale - Check Weight Method.* Use Check Weights calibrated for suitable scale values (i.e., 20%, 50% and 80% of pendulum capacity.) Different Check Weights are needed for each pendulum capacity.

5.1.3.1 With the pendulum in the raised position, attach the weight into position and fasten it securely, according to the manufacturer's instructions. Depress the pendulum stop, thus releasing the pendulum, and catch the pendulum on the return swing. Read the indicating device to the nearest division.

5.1.3.2 Repeat this procedure with each of the check weights.

5.2 *Adjustment of tearing distance*

5.2.1 To check the 43.0-mm tearing distance, apply a small amount of graphite (from an ordinary pencil), to the cutting knife so that when the cut is made, some of the graphite transfers to the paper. This serves to contrast the cut from the uncut portion of the paper and facilitates the measurement. Make this measurement with a vernier caliper with a depth gauge or a good quality steel rule, readable to 0.2 mm or better under magnification. You may also check that the cut is 20 mm at the same time. An alternative procedure is to use a go, no-go gauge, which may be available from the manufacturer of the instrument.

5.3 *Adjustment of instrument for operation*

5.3.1 *Pendulum notching.* Sometimes, as a result of frequent use, a notch is worn in the pendulum sector at the point of contact with the sector stop, giving a jerky release of the pendulum. If this happens, either repair the sector by cutting out and replacing the worn edge, or adjust the height of the stop to the very lowest point of the sector edge. In this case, recheck the calibration of the scale.

5.3.2 *Clamp alignment and knife condition.* Rest the pendulum sector against its stop, and check the alignment of the clamps. Adjust the pendulum stop if necessary. Verify by visual check that the knife is centered between the clamps, and adjust if necessary. Check the sharpness of the knife. A dull knife will result in a square notch near the top of the cut with the paper pushed out. If necessary, sharpen the knife with a rough stone; a rough edge is better than a sharp, smooth edge. Check the tearing distance and adjust the height of the knife if necessary. Do not change the dimensions of the specimen to adjust the tearing distance.

5.3.3 *Instrument mounting.* Support the instrument on a table so rigid that there will be no perceptible movement of the table or instrument during the swing of the pendulum. Any movement of the instrument base during the swinging of the pendulum may be a significant source of error.

NOTE 2: Threaded bolt holes are usually provided in the base of the instrument and may be used to secure the instrument to the table. An alternative procedure is to place the instrument on a guide which ensures that the instrument always has the same position on the table. Such a guide may be available from the manufacturer of the instrument.

5.3.4 *Instrument leveling.* Level the instrument so that, with the sector free, the line on the sector indicating the vertical from the point of suspension is bisected by the edge of the pendulum stop mechanism.

5.3.5 *Pendulum friction (older instruments).* Draw a pencil line on the stop-mechanism 25 mm to the right of the edge of the sector stop. Raise the sector to its initial position and set the pointer against its stop. On releasing the sector and holding the sector stop down, the sector should make at least 20 complete oscillations before the edge of the section which engages the stop no longer passes to the left of the pencil line. Otherwise, clean, oil, and adjust the bearing.

5.3.6 *Pendulum friction (newer instruments).* In recent years, a new type of frictionless bearing made of synthetic material has been used. This bearing will not necessarily allow the pendulum sector to make 20 complete oscillations as the older one did. This does not mean that there is excess friction in the pendulum swing. These newer bearings should not be oiled. Consult the instructions supplied with the instrument for guidance. Some instruments have a "zero-calibration" to eliminate the influence of the different kinds of friction involved. That means that the test is started by letting the pendulum swing without any test piece. (There is a connection between the pendulum and a incremental encoder.) The instrument stores this as a reference value in internal memory. During normal paper testing with the instrument, the reference value is subtracted from the measured value. If the instrument is equipped with pneumatically activated grips, check that the tubing used does not hinder pendulum action.

5.3.7 *Pointer adjustments*

5.3.7.1 *Pointer zero reading.* Operate the leveled instrument several times with nothing in the jaws, the movable

jaw being closed. If zero is not registered, the pointer stop should be adjusted until the zero reading is obtained. Do not change the level to adjust the zero.

5.3.7.2 *Pointer friction.* Set the pointer at the zero reading on the scale before releasing the sector, and after release see that the pointer is pushed not less than 2.5 mm nor more than 4.0 mm beyond the zero. If the pointer friction does not cause it to lie between these two distances, remove the pointer, wipe the bearing clean, and apply a trace of good clock oil to the groove of the bearing, adjust the spring tension or make other adjustments to achieve the specified friction. Reassemble, readjust the zero setting, and recheck the pointer friction.

5.3.8 For digital instruments with automatic calibrations, follow the manufacturer's instructions and consult the manual for maintenance.

6. Sampling and test specimens

6.1 Sample the paper in accordance with TAPPI T 400 "Sampling and Accepting a Single Lot of Paper, Paperboard, Containerboard, or Related Product." From each test unit of the sample, prepare 10 representative specimens in each principal direction of the paper, unless a test in only one direction is required. For each specimen keep the wire sides of all the plies facing the same way.

NOTE 3: It has been found (8) that there is usually no advantage in testing more than 10 specimens of a homogeneous test unit of the sample.

6.2 Cut each ply for a test specimen at least 53 mm long by 63.0 ± 0.15 mm wide, taking all the plies to be torn together from a single sheet, or if this does not provide sufficient material, from adjacent sheets of a unit.

NOTE 4: The correct length of the test specimen to be used in making a test, measured in millimeters, is equal to the distance between the outermost edges of each of the instrument's jaws (± 2 mm). For the instrument described in 4.1.2, that distance is at least 2×25 mm (the minimum width for each jaw face) plus 2.8 mm (the distance between the clamps) or at least 53 mm. In the United States, the majority of instruments have jaws 36 ± 1 mm wide. In such cases, a test specimen length of 76 ± 2.0 mm, specified in previous versions of this method, continues to be the correct length.

6.3 Determine from a preliminary test or the product specification how many plies are needed to make up a specimen so that, when torn together on the instrument having a 15.7-N (1600 gf) capacity, they give an instrument scale reading nearest 40% of full scale.

NOTE 5: The work done in tearing a number of sheets of paper includes a certain amount of work to bend the paper continuously as it is torn to provide for the rubbing of the torn edges of the specimen together and to lift the paper. The number of plies torn at one time and their size can affect the test result with some papers. Empirical requirements for both the apparatus and the method are therefore necessary to keep the additional work not used for tearing to a definite quantity. For this reason, in making comparisons between two or more sets of paper of the same type and grammage, use the same number of plies for each set.

7. Procedure

7.1 Precondition, condition, and test the specimens in accordance with TAPPI T 402 "Standard Conditioning and Testing Atmospheres for Paper, Board, Pulp Handsheets, and Related Products."

7.2 Raise the pendulum sector to its initial position and set the pointer against its stop. Center the specimen in the clamps with the bottom edge carefully set against the stops. Securely clamp the specimen using approximately the same pressure on both clamps. Make the initial knife cut. Depress the pendulum stop quickly as far as it will go to release the pendulum. Hold down the stop until after the tear is completed and catch the pendulum on the return swing without disturbing the position of the pointer.

7.3 Make only one test per specimen, each specimen consisting of the same number of plies. Make tests alternately with the wire sides of all the plies of a specimen facing the pendulum and with the wire sides of all the plies away from the pendulum. Make certain that the specimen leans toward and not away from the pendulum by gently bending the specimen at the clamp if necessary, but in doing so avoid affecting the moisture content of the test area (9).

7.4 Record the scale readings to the nearest half division; also record the number of plies used in the specimens.

7.5 If the line of tear fails to pass through the top edge of the specimen but deviates to one side, note and report this, but do not use the reading so obtained. If more than one-third of the tests exhibit this behavior, this method should not be used for the material concerned. If the sheets split extensively when being torn, this also should be reported.

7.6 Calculate the average tearing force in millinewtons and, if desired, in grams-force required to tear a single ply as follows:

7.6.1 For the standard 1600-gf instrument with 0-100 scale:

Average tearing force, mN = $(16 \times 9.81 \times \text{average scale reading}) / \text{number of plies}$

Average tearing force, gf = $(16 \times \text{average scale reading}) / \text{number of plies}$

7.6.2 If an instrument has an SI metric scale (e.g., 0-1000 graduations):

Average tearing force, mN = $(16 \times \text{avg. scale reading} \times \text{capacity, N}) / (\text{number of plies} \times 15.7 \text{ N})$

Average tearing force, gf = $(16 \times \text{avg. scale reading} \times \text{capacity, N}) / (9.81 \times \text{number of plies} \times 15.7 \text{ N})$

7.6.3 If an instrument has a direct-reading scale (e.g., digital read-out) that directly gives the force per ply when preset for the number of plies:

Average tearing force, mN = scale reading if directly in millinewtons, or
= $9.81 \times \text{scale reading}$ if in grams-force

Average tearing force, gf = scale reading / 9.81, if scale is in millinewtons, or
= scale reading if directly in grams-force

8. Report

8.1 Report results with the tear parallel with the machine direction as resistance to internal tearing in the machine direction and those with the tear perpendicular to the machine direction as resistance to internal tearing in the cross direction.

8.2 For each principal direction, report the average, maximum, and minimum of accepted test values of the force required to tear a single ply to three significant figures.

8.3 For a complete report, state the number of plies torn at one time; the number and value of any rejected readings and reasons for their rejection; and the make and model number of the instrument used.

9. Precision

9.1 On the basis of studies made in accordance with TAPPI T 1200 "Interlaboratory Evaluation of Test Methods Used with Paper and Board Products," the precision of test results representing the average of ten readings, has been found to be as follows:

9.1.1 Repeatability (within a laboratory) = 4.2%

9.1.2 Reproducibility (between laboratories) = 12.5%

9.2 In each of the above situations, two test results, each representing an average of ten readings, may be considered alike with a probability of 95% when the two results agree within the appropriate value shown above.

10. Keywords

Paper, Tear strength, Tensile properties

11. Additional information

11.1 Effective date of issue: February 27, 1998.

11.2 The principal changes made in this revision are: (a) exclusion of pendulums of weights other than 1600 gf; (b) exclusion of references to single-ply testing; (c) inclusion of digital instruments; and (d) inclusion of instruments with check weights not mounted in clamps.

11.3 Related methods: ASTM, D 689; Australian APPITA, P 400; British BS 4468; Canadian CPPA, D.9; ISO 1974; SCAN-P 11:73.

7 / Internal-tearing resistance of paper (Elmendorf-type method)

T 414 om-98

11.4 Other references related to this method are by Jones and Galley (11), Van den Akker, Wink, and Van Eperen (12), Sun, Wilson, and Bach (13), Lashof (14), and Swartout and Setterholm (15).

References

1. Cohen, W. E., and Watson, A. J., *Proc. Australian Pulp Paper Ind. Tech. Assn.* 3: 212 (1949).
2. Wink, W. A., and Van Eperen, R. H., *Tappi* 46: 323 (1963).
3. Elmendorf, A., "Strength Test for Paper," *Paper* 26: 302 (1920).
4. Elmendorf, A., "The Principle of the Elmendorf Paper Tester," *Paper* 28: (1921).
5. Institute of Paper Chemistry, "Tearing Strength of Paper, Part I," *Instrumentation Studies XLVI, Paper Trade J.* 118(5):13 (1944).
6. Yarber, W. H. II, and Zdzieborski, J. H. George, *Tappi* 55: 1064 (1972).
7. Clark, J. d'A., *Tech. Assn. Papers. Series XV* 1:262 (1932); *Paper Trade J.* 94 (1): 33 (1932).
8. Lashof, T. W., *Tappi* 45: 656 (1962).
9. Balder, E. B., *Tappi* 63 (8): 103 (1980).
10. Jones, H.W.H., and Galley, W., *Pulp Paper Mag. Can.* 53(5): 116 (1952).
11. Van Den Akker, J. A., Wink, W. A., and Van Eperen, R. H., *Tappi* 50 (9): 46 (1967).
12. Sun, B. C., Wilson, J. W., and Bach, L., *Tappi* 59 (10): 106 (1976).
13. Lashof, T. W., *Tappi* 47: 445 (1964).
14. Swartout, J. T., and Setterholm, V. C., U.S. Forest Service Research Note FPL, 05 (May 1968).

Your comments and suggestions on this procedure are earnestly requested and should be sent to the TAPPI Technical Operations Manager. ■