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

วศ กว
อว 16

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8 ว

ของ

นายยุทธนาพงศ์ แดงเพ็ง

เรื่อง การฟอกเยื่อฟางข้าวด้วยกระบวนการแบบปราศจากธาตุคลอรีน

ผู้ดำเนินการ
นายยุทธนาพงศ์ แดงเพ็ง
นักวิทยาศาสตร์ 7ว

กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3
กองการวิจัย
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
พ.ศ. 2543

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8 ว

ของ

นายยุทธนาพงศ์ แดงเพ็ง

เรื่อง การฟอกเยื่อฟางข้าวด้วยกระบวนการแบบปราศจากธาตุคลอรีน

เลขหมู่ วศ ว
ยง 16
เลขทะเบียน 11581
วันที่ 16 ธ.ค. 46

ผู้ดำเนินการ
นายยุทธนาพงศ์ แดงเพ็ง
นักวิทยาศาสตร์ 7ว

ด้วยอภินันทนาการ
จาก
ว.ศ.

กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3
กองการวิจัย
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

พ.ศ. 2543

บทคัดย่อ

รายงานนี้เสนอผลการวิจัยการฟอกเยื่อฟางข้าวด้วยกระบวนการแบบปราศจากธาตุคลอรีน โดยทดลองนำกรดซัลฟูริกมาใช้ฟอกเยื่อในขั้นตอนแรก แล้วตามด้วยขั้นเปอร์ออกไซด์และขั้นไฮโปคลอไรท์ ผลการศึกษาพบว่า

1. การนำกรดซัลฟูริกมาใช้ในขั้นตอนแรกของการฟอกเยื่อสามารถลดปริมาณลิกนินลงได้มากและเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าว โดยเมื่อใช้กรดซัลฟูริก ร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง สามารถลดค่า kappa number ของเยื่อจากเดิม 19.2 ลงเหลือเพียง 11.1 และความขาวสว่างเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ร้อยละ 37.8 เป็นที่ระดับร้อยละ47 แสดงว่าสามารถใช้กรดซัลฟูริกในการฟอกเยื่อกระดาษได้

2. เยื่อหลังผ่านกระบวนการฟอกด้วยกรดซัลฟูริก ตามด้วยขั้นเปอร์ออกไซด์ ปรากฏว่าความขาวสว่างของเยื่อเพิ่มขึ้นสูงถึงระดับร้อยละ 69 เมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการฟอกร้อยละ 2.25(center point) ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และลดค่า kappa number เหลือเพียงประมาณ 7 หน่วย

3. ในขั้นการฟอกด้วยแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ ซึ่งได้ค่าความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าวหลังฟอกไม่ต่ำกว่าที่ระดับร้อยละ 75 ซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างที่ได้จากกระบวนการฟอกแบบดั้งเดิม

จากการศึกษาวิจัยแสดงว่าการฟอกเยื่อฟางข้าวด้วยกระบวนการแบบปราศจากธาตุคลอรีน โดยเป็นการฟอก 3 ขั้นตอน แบบ APH สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมได้ ซึ่งจะช่วยทดแทนการใช้คลอรีนในสภาพของก๊าซ หรือ น้ำคลอรีนได้ เป็นการช่วยลดมลภาวะของสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
สารบัญตาราง	ก
สารบัญภาพ	ข
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
แนวทางการดำเนินการ	3
วิธีการทดลอง	7
ผลการทดลอง	11
วิจารณ์ผลการทดลอง	15
สรุปผลการทดลอง	18
คำขอบคุณ	23
เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ	25

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงค่าปริมาณการใช้สารเคมีพร้อมด้วยเลขรหัส	4
2	การทดลองแบบ 2^3 CCRD(central composite rotatable design)	5
3	สภาวะการฟอกในขั้นฟอกด้วยกรด	7
4	สภาวะการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นเปอร์ออกไซด์	8
5	สภาวะการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นแคลเซี่ยมไฮโปคลไรท์	9
6	ผลการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นตอนการฟอกด้วยกรดซัลฟูริก	11
7	ผลการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นตอนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	12
8	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเยื่อฟางข้าวหลังผ่านการฟอกในขั้นไฮโปคลอไรท์(APH)	13
9	สมบัติทางกายภาพของเยื่อฟางข้าวหลังผ่านการฟอกในขั้นไฮโปคลอไรท์(APH)	14

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1 แสดงผลของกรดซัลฟูริกที่มีผลต่อการลดค่า Kappa number ของเยื่อฟางข้าว 18

2 แสดงผลของกรดซัลฟูริกที่มีผลต่อการลดค่าความเหลืองของเยื่อฟางข้าว 18

3 แสดงผลของกรดซัลฟูริกที่มีผลต่อการเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าว 19

4 แสดงผลของกรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดค่าค่า Kappa number ของเยื่อฟางข้าว 20

5 แสดงผลของกรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าว 21

บทที่ 1
คำนำ

1.1 ที่มาของการศึกษาวิจัย

อุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีผลกระทบและทำลายสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากทั้งในแง่การใช้ทรัพยากรธรรมชาติและการปล่อยน้ำทิ้ง โดยเฉพาะน้ำทิ้งจากขั้นตอนการผลิตเยื่อฟอกขาวซึ่งส่วนใหญ่จะต้องใช้สารเคมี เช่น ก๊าซคลอรีนและสารประกอบคลอรีน ในกระบวนการฟอกดังกล่าวได้ก่อให้เกิดสารประกอบที่จัดเป็นสารพิษหลายตัว เช่น Dioxin และ Adsorbable organic halogen compounds (AOX) ถูกปล่อยออกมาน้ำทิ้งของโรงงานเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หากโรงงานไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่ดีแล้วน้ำทิ้งเหล่านี้จะส่งผลกระทบทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ทำให้แม่น้ำลำคลองที่รองรับน้ำเสียเกิดการเน่าเหม็นจนสัตว์น้ำไม่อาจดำรงชีวิตอยู่ได้ นอกจากจะทำลายระบบนิเวศน์ของสัตว์น้ำแล้วยังส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของผู้คนจำนวนมากที่อาศัยประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นอีกด้วย

กระบวนการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิม (conventional bleaching) ซึ่งยังคงมีใช้อยู่ในประเทศไทย เป็นการฟอกแบบ **C E H** ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการฟอกที่เรียงลำดับกัน ดังนี้

ขั้นคลอริเนชั่น (chlorination stage, C)

ขั้นการสกัดด้วยด่าง (alkali extraction stage,E) และ

ขั้นไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite stage,H)

ขั้นคลอริเนชั่นเป็นขั้นตอนการฟอกที่ทำให้เกิดสารพิษมากที่สุด เพราะใช้คลอรีนซึ่งได้จากการผ่านก๊าซคลอรีนลงในน้ำแล้วนำน้ำคลอรีนไปใช้ฟอกเยื่อในระหว่างการฟอกคลอรี จะทำฏิกิริยากับลิกนินเกิดสารสารประกอบมีชื่อเรียกว่า AOX (adsorbable organic halogen compounds) และ Dioxin (polychlorinated dibenzo-p-dioxin)ในขั้นคลอริเนชั่นจะเกิดปฏิกริยาทางเคมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการแทนที่ (substitution) และปฏิกิริยาการเติม (addition) คลอรีนจะทำปฏิกริยาเฉพาะลิกนิน (lignin) และสารสกัด (extractives) เท่านั้น ในปฏิกริยาการแทนที่คลอรีน จะเข้าแทนที่ในฟังก์ชั่นกรุ๊ปของลิกนินแล้วแตกกระจายตัวออกเป็นสารประกอบ AOX ซึ่งประกอบด้วยคลอรีนอะตอมตั้งแต่ 1 หรือมากกว่า ส่วนในปฏิกริยาการเติม คลอรีนจะสร้างพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) กับลิกนินเกิดสารประกอบพวก Dioxin ซึ่งยากต่อการทำลายไม่ว่าจะใช้การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือดิสโซลูชั่น (dissolution) ส่วนใหญ่จะยังคงตกค้างอยู่ในเยื่อในรูปของ chlorinated dioxin สารประกอบทั้ง 2 ชนิดนี้ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ซึ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการฟอกเยื่อด้วยคลอรีนดังกล่าว ทำให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อหาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาช่วยในการฟอกเยื่อ อาทิเช่น กระบวนการฟอกเยื่อแบบปราศจากคลอรีน (Total Chlorine Free Bleaching Process) เช่น การฟอกเยื่อแบบ O-E-P, O-E-P-P, A-E-P-P ซึ่งเป็นการฟอกเยื่อที่ไม่มีการใช้คลอรีนในกระบวนการฟอก หรือ อาจจะมีการใช้สารประกอบคลอรีนในกระบวนการฟอกด้วยเรียกว่า กระบวนการฟอกเยื่อแบบปราศจากธาตุคลอรีน (Elemental Chlorine Free Bleaching Process) เช่น การฟอกเยื่อแบบ D-E-D, O-D-E-D A-E-P-H เป็นต้น ซึ่งเป็นกระบวนการฟอกเป็นแบบหลายขั้นตอน โดยใช้สารเคมีต่างๆ คือ กรดซัลฟูริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ออกซิเจน และโอโซน เข้ามาแทนที่คลอรีนในกระบวนการฟอกเยื่อ ซึ่งในปัจจุบัน

จึงได้มีความพยายามลดปริมาณการใช้คลอรีน ในกระบวนการฟอกลงหรือหาสารเคมีอื่นมาทดแทนในขั้นตอนการฟอกดังกล่าวโดยนำเอากรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาใช้แทนคลอรีนซึ่งจะมีกระบวนการฟอกเป็นแบบหลายขั้นตอน เช่น A-E-H, A-P-H, A-E-P-H หรือ A-E-P-P โดยที่

ขั้นกรด (Acid stage,A)

ขั้นการสกัดด้วยด่าง (Alkaline extraction stage,E) และ

ขั้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide stage,P)

ขั้นไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite stage,H)

จะเห็นได้ว่าในกระบวนการทั้งแบบบปราศจากคลอรีนหรือแบบปราศจากธาตุคลอรีน จะได้เยื่อที่เรียกว่าเยื่อที่ปราศจากคลอรีน (total chlorine free pulp, TCFP) และเยื่อที่ปราศจากธาตุคลอรีน (elemental chlorine free pulp,ECFP) ซึ่งในประเทศไทยเดิมทียังไม่มีการผลิตเยื่อทั้งสองชนิดนี้ เพราะเกี่ยวเนื่องกับข้อจำกัดทั้งทางด้านเทคโนโลยีและเงินทุน แต่ในปัจจุบันจากกระแสแรงกดดันทางด้านปัญหาสิ่งแวดล้อมได้มีโรงงานบางแห่งพยายามที่จะลดปริมาณการใช้ก๊าซคลอรีนในขั้นคลอริเนชั่น และสารประกอบคลอรีนในขั้นไฮโปคลอไรท์ โดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าช่วยหรือเปลี่ยนเป็นใช้คลอรีนไดออกไซด์แทนก๊าซคลอรีนและสารประกอบคลอรีนแต่โรงงานที่มีอยู่ภายในประเทศส่วนใหญ่ยังคงใช้วิธีการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิมอยู่ ดังนั้นกลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 จึงเล็งเห็นว่าการศึกษาวิจัยการฟอกเยื่อฟางข้าวแบบปราศจากธาตุคลอรีนเพื่อเป็นข้อมูลทางวิชาการและเป็นสิ่งจูงใจให้รณรงค์ในการรักษาสิ่งแวดล้อมในการลดปริมาณการใช้สารคลอรีนในการฟอกเยื่อ หรือใช้สารเคมีอื่นทดแทน โดยทางกลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 ได้ใช้ระบบการฟอกแบบ 3 ขั้นตอน เป็น A-P-H ซึ่งเลียนแบบการฟอกแบบดั้งเดิม คือ C-Ep-H ซึ่งโรงงานจะได้ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงกระบวนการฟอกมากนัก เพียงแต่ใช้ปริมาณของกรดทดแทนการใช้ปริมาณของก๊าซคลอรีน ซึ่งถือว่าการควบคุมสภาวะการฟอกไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงวางแนวทางในการศึกษาวิจัยโดยเริ่มต้นด้วยการใช้กรดซัลฟูริก เพื่อช่วยแยกลิกนินออกจากเยื่อ (Pulp delignification) ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นตอนการฟอกด้วยกรด (acid stage, A) เพื่อช่วยลดค่า kappa number และเพิ่มค่าความขาวสว่าง แล้วตามด้วยการฟอกในขั้นเปอร์ออกไซด์ จากนั้นทำการฟอกต่อด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ในขั้นไฮโปคลอไรท์ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย

การฟอกทั้งหมดจะเป็นการฟอกแบบ 3 ขั้นตอน เรียงตามลำดับดังนี้ A-P-H

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลการฟอกเยื่อฟางข้าวด้วยกระบวนการแบบปราศจากธาตุคลอรีนโดยใช้การฟอกแบบ A-P-H

1.3 แนวทางการดำเนินงาน

เพื่อให้การศึกษาวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ จึงกำหนดแนวทางการดำเนินงานที่เหมาะสม ดังนี้

1.3.1 การออกแบบการทดลอง (experimental design)

ในการศึกษาวิจัยเลือกใช้วิธีออกแบบการทดลองเชิงสถิติ สำหรับใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ต้องการจะศึกษา ผลของตัวแปรกับสมบัติเยื่อ เปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปร ความสำคัญทางสถิติของตัวแปร และประหยัดเวลาในการทดลองเมื่อเทียบกับวิธีกำหนดตัวแปรทีละตัว การศึกษาวิจัยนี้มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ต้องการจะศึกษามากกว่า 1 ตัวแปรและแต่ละตัวแปรจะมีระดับของการศึกษาหลายระดับจึงเลือกใช้การทดลองแบบ 2^3 **CCRD** (central composite rotatable design)ในขั้นการฟอกเยื่อแบบ A-P-H ดังนี้

1.3.1.1 การฟอกเยื่อในขั้นกรด ขั้นเปอร์ออกไซด์ และขั้นไฮโปคลอไรท์

ในขั้นกรด ขั้นเปอร์ออกไซด์ และปริมาณคลอรีนในขั้นไฮโปคลอไรท์ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามซึ่งได้แก่ ความขาวสว่าง (brightness) ความเหลือง (yellowness) และผลผลิตเยื่อ (yield) โดยเลือกแผนการทดลองเป็น 2^k **CCRD** (central composite rotatable design) โดยออกแบบเป็น2^3 **CCRD** และในแต่ละตัวแปรมีระดับปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็น 2 ระดับ คือ เลขรหัส + 1 และเลขรหัส 1 ของแต่ละตัวแปร (3 ตัวแปร คือปริมาณของกรดซัลฟูริกในขั้นกรด ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นเปอร์ออกไซด์ และปริมาณคลอรีนในขั้นไฮโปคลอไรท์) ดังนั้นขนาดของการทดลองจึงเท่ากับ 8(2x2x2 = 8) จุดการทดลองและการออกแบบการทดลองแบบ CCRD ต้องกำหนดจุดการทดลองที่จุดกลาง(centre point) คือ เลขรหัส 0 เพื่อใช้ในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อน (estimating errors) อีก 8 จุดการทดลอง แต่ในการปฏิบัติงานจุดการทดลองที่จุดกลางกระทำเพียง 6 จุดการทดลอง ก็สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนได้ และในขณะเดียวกันจำต้องทำจุดการทดลองเพิ่มเติมที่จุด augmented point + α และ - α สำหรับการดูแนวโน้มของผลการทดลอง โดยที่ระยะห่างของ $\pm\alpha$ จะห่างจากจุดการทดลองที่จุดกลางเท่ากัน คือ เท่ากับ 1.68 ($2^{k/4} = 2^{3/4} = 1.6818 \sim 1.68$) จุดการทดลองจึงเพิ่มขึ้นอีก 6 จุดการทดลอง รวมจุดการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 20 (8+6+6 = 20) และเพื่อสะดวกในการปฏิบัติงานจึงได้ใช้ค่าแสดงปริมาณการใช้สารเคมีต่อร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเป็นเลขรหัส (coded value) ดังกล่าว

ตารางที่ 1 แสดงค่าปริมาณการใช้สารเคมีพร้อมด้วยเลขรหัส

เลขรหัส	ปริมาณการใช้สารเคมี, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง		
	กรดซัลฟูริก	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	แคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์
$-\alpha$	1.0	0.5	0.5
-1	1.608	1.21	1.21
0	2.50	2.25	2.25
+1	3.392	3.29	3.29
$+\alpha$	4.0	4.0	4.0

จะเห็นว่าในแต่ละระดับจุดการทดลองจะประกอบด้วยระดับต่างๆ ของทุกตัวแปรที่จะศึกษาทดลอง การออกแบบการทดลองในขั้นนี้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดลองแบบ 2^3 CCRD (central composite rotatable design)

การทดลอง (ทรีตเมนต์)	ขั้นกรด (A)		ขั้นเปอร์ออกไซด์ (P)		ขั้นไฮโปคลอไรท์ (H)	
	ปริมาณกรดซัลฟูริก		ปริมาณไฮโดรเจนเปอรออกไซด์		ปริมาณคลอรีน	
	เลขรหัส	ร้อยละ	เลขรหัส	ร้อยละ	เลขรหัส	ร้อยละ
1	- 1	1.608	+1	3.29	- 1	1.21
2	- 1	1.608	- 1	1.21	- 1	1.21
3	+ 1	3.392	+1	3.29	- 1	1.21
4	+ 1	3.392	- 1	1.21	- 1	1.21
5	- 1	1.608	+1	3.29	+1	3.29
6	- 1	1.608	- 1	1.21	+1	3.29
7	+ 1	3.392	+1	3.29	+1	3.29
8	+ 1	3.392	- 1	1.21	+1	3.29
9	0	2.5	0	2.25	$-\alpha$	0.5
10	0	2.5	0	2.25	$+\alpha$	4.0
11	0	2.5	$-\alpha$	0.5	0	2.25
12	0	2.5	$+\alpha$	4.0	0	2.25
13	$-\alpha$	1.0	0	2.25	0	2.25
14	$+\alpha$	4.0	0	2.25	0	2.25
15	0	2.5	0	2.25	0	2.25
16	0	2.5	0	2.25	0	2.25
17	0	2.5	0	2.25	0	2.25
18	0	2.5	0	2.25	0	2.25
19	0	2.5	0	2.25	0	2.25
20	0	2.5	0	2.25	0	2.25

การทดลองนี้เริ่มต้นการฟอกขั้นกรดด้วยกรดซัลฟูริก ตามด้วยการฟอกขั้นเปอร์ออกไซด์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการฟอกขั้นไฮโปคลอไรท์เป็นขั้นตอนสุดท้าย จุดการทดลองที่ 1-14 แสดงปริมาณการใช้กรดซัลฟูริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ เช่น จุดการทดลองที่ 1 ใช้ปริมาณกรดซัลฟูริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ที่ร้อยละ 1.608 (- 1), 3.29 (+1) และ 1.21(-1) ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ตามลำดับ สำหรับจุดการทดลองที่ 15 - 20 แสดงปริมาณการใช้กรดซัลฟูริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ของการทดลองที่จุดกลาง (center point)

1.3.2 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่จะใช้ในการฟอก ได้แก่ เยื่อและสารเคมี

1.3.2.1 เยื่อ เยื่อที่ใช้เป็นเยื่อเคมีของบริษัท โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด ซึ่งผลิตจากฟางข้าวด้วยกระบวนการผลิตเยื่อแบบโมโนซัลไฟต์ (monosulfite process) มีความขาวสว่างร้อยละ 37.8 ความเหลือง 25.4 หน่วย และมีค่า kappa number เท่ากับ 19.2

1.3.2.2 สารเคมี การฟอกในแต่ละขั้นตอนใช้สัญญลักษณ์และเรียกชื่อตามสารเคมีที่ใช้ ดังนี้

ขั้นตอนการฟอก	สารเคมี	สัญญลักษณ์
acid stage	sulfuric acid	A
peroxide stage	hydrogen peroxide	P
hypochlorite stage	calcium hypochlorite	H

1.3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

- อ่างควบคุมอุณหภูมิ
- เครื่องทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน
- เครื่องดูดสูญญากาศ
- เครื่องวัดค่าฟรีเนส
- ถุงพลาสติกทนความร้อน
- เครื่องทดสอบแรงดึง
- เครื่องกระจายเยื่อ
- เครื่องทดสอบแรงดันทะลุ
- ตู้อบสูญญากาศ
- เครื่องทดสอบความขาวสว่าง
- หม้อต้มเยื่อ(autoclave) ขนาดความจุ 2.5 ลิตร
- กรวยแก้ว(fritted glass buchner funnel)
- เครื่องให้ความร้อนด้วย polyethylene glycol (polyethylene glycol bath)

1.4 ระยะเวลาการศึกษาวิจัย

มีนาคม 2543 — กรกฎาคม 2543

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้กระบวนการฟอกเยื่อฟางข้าวที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม

1.5.2 ได้รับความรู้ทางเทคโนโลยีการฟอกเยื่อใหม่ สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงทางวิชาการ

บทที่ 2

วิธีการทดลอง

2.1 การฟอกเยื่อในขั้นกรด (A)

โดยศึกษาผลของกรดซัลฟูริกต่อการลดปริมาณลิกนินและการเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าว ซึ่งเยื่อฟางข้าวที่ใช้ในการศึกษาทดลองเป็นเยื่อฟางข้าวชนิดไม่ฟอกที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด มีค่า kappa number เท่ากับ 19.2 ความขาวสว่างร้อยละ 37.8 และความเหลือง 25.4 หน่วย ทำการฟอกเยื่อในขั้นกรด โดยควบคุมสภาวะการฟอกตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สภาวะการฟอกในขั้นกรด (A)

สภาวะการฟอกในขั้นกรด	
น้ำหนักเยื่อ, กรัมน้ำหนักอบแห้ง	**200**
ความข้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ	**10**
อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส	**100**
เวลาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส, นาที	**60**
ปริมาณกรด,ร้อยละ	**1.0,1.608,2.5,3.392,4.0**

2.1.1 ชั่งเยื่อ 200 กรัมน้ำหนักอบแห้ง (จำนวน20 ชุด ตามการออกแบบการทดลองที่กำหนดตามตารางที่ 2) แช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วนำไปกระจายด้วยเครื่องกระจายเยื่อ

2.1.2 นำเยื่อจากข้อ 2.1.1 เติมน้ำและปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามสภาวะที่กำหนดในตารางที่ 3 และกำหนดปริมาณของกรดซัลฟูริกตามแผนการทดลองในตารางที่ 2 คลุกเคล้าให้เข้ากันดี โดยการฟอกกระทำในถุงพลาสติกทนความร้อนแล้วนำถุงไปแช่ในอ่างน้ำร้อนซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที ระหว่างช่วงเวลาการฟอกให้นำถุงเยื่อออกมานวดคลุกเคล้า ทุกๆ 15 นาที

2.1.3 เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำเยื่อออก ล้างเยื่อให้สะอาดด้วยน้ำประปาโดยกรองผ่านด้วยกรวยกรอง ชั่งน้ำหนักของเยื่อที่ได้แล้วนำไปหาปริมาณความชื้น เพื่อคำนวณ
เป็นร้อยละของผลผลิตเยื่อที่ได้

2.1.4 แบ่งเยื่อไปทำแผ่นทดสอบ เพื่อวัดค่าความขาวสว่างตามมาตรฐาน SCAN C-11-75 หลังจากได้แผ่นทดสอบแล้ววัดค่าความขาวสว่างด้วยเครื่อง Elrepho 2000

2.1.5 แบ่งเยื่อไปวิเคราะห์เพื่อหาค่า kappa number ตามมาตรฐาน Tappi T 236

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 6

2.2 การฟอกเยื่อในขั้นเปอร์ออกไซด์ (P)

นำเยื่อที่ผ่านการฟอกในขั้นกรดทั้ง 20 ชุดการทดลอง มาฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นเปอร์ออกไซด์ ซึ่งได้กำหนดสภาวะการฟอกเยื่อตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สภาวะการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นเปอร์ออกไซด์ (P)

สภาวะการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นเปอร์ออกไซด์	
น้ำหนักเยื่อ, กรัมน้ำหนักอบแห้ง	**120**
ความข้นของน้ำเยื่อ , ร้อยละ	**10**
อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส	**70**
เวลาที่ใช้ในการฟอก, นาที	**120**
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง	**0.5, 1.21, 2.25, 3.29, 4.0**

2.2.1 นำเยื่อที่ผ่านขั้นกรดจากข้อ 2.1.3 เติมน้ำและปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามสภาวะที่กำหนดในตารางที่ 4 และกำหนดปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามแผนการทดลองในตารางที่ 2 คลุกเคล้าให้เข้ากันดี โดยการฟอกกระทำในถุงพลาสติกทนความร้อนแล้วนำถุงไปแช่ในอ่างน้ำร้อน (water bath) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที ระหว่างช่วงเวลาการฟอกให้นำถุงเยื่อออกมานวดคลุกเคล้า ทุกๆ 20 นาที

2.2.2 เมื่อครบเวลาที่กำหนด คือ 120 นาที นำเยื่อออก ล้างเยื่อให้สะอาดด้วยน้ำประปาโดยกรองผ่านด้วย fritted glass buchner funnel ชั่งน้ำหนักของเยื่อที่ได้แล้วนำไปหาปริมาณความชื้น เพื่อคำนวณเป็นร้อยละของผลผลิตเยื่อที่ได้

2.2.3 แบ่งเยื่อไปทำแผ่นทดสอบ เพื่อวัดค่าความขาวสว่างตามมาตรฐาน SCAN C-11-75 หลังจากได้แผ่นทดสอบแล้ววัดค่าความขาวสว่างด้วยเครื่อง Elrepho 2000

2.2.4 แบ่งเยื่อไปวิเคราะห์เพื่อหาค่า kappa number ตามมาตรฐาน Tappi T 236

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7

2.3 ขั้นไฮโปคลอไรท์ (H)

เยื่อหลังจากผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปฟอกต่อด้วยแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ โดยควบคุมสภาวะการฟอกเยื่อกำหนดตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สภาวะการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ (H)

สภาวะการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์	
น้ำหนักเยื่อ, กรัมน้ำหนักอบแห้ง	60
ความข้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ	10
อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส	70
เวลาที่ใช้ในการฟอก, นาที	240
ปริมาณแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ (ปริมาณคลอรีน), ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง	0.5, 1.21, 2.25, 3.29, 4.0
ความเป็น กรด-ด่าง เริ่มต้น	~11

2.3.1 นำเยื่อที่ผ่านขั้นเปอร์ออกไซด์จากข้อ 2.2.2 เติมน้ำและปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามสภาวะที่กำหนดในตารางที่ 5 และกำหนดปริมาณของปริมาณของคลอรีน (ขั้นแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์) ตามแผนการทดลองในตารางที่ 2 แล้วควบคุมความเป็นกรด-ด่างประมาณ 11 ด้วยสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ คลุกเคล้าให้เข้ากันดี โดยการฟอกกระทำในถุงพลาสติกทนความร้อนแล้วนำถุงไปแช่ในอ่างน้ำร้อน ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 240 นาที ระหว่างช่วงเวลาการฟอกให้นำถุงเยื่อออกมานวดคลุกเคล้า ทุกๆ 30 นาที

2.3.2 เมื่อครบเวลาที่กำหนด คือ 240 นาที นำเยื่อออก ล้างเยื่อให้สะอาดด้วยน้ำประปาโดยกรองผ่านกรวยแก้ว ชั่งน้ำหนักของเยื่อที่ได้แล้วนำไปหาปริมาณความชื้น เพื่อคำนวณเป็นร้อยละของผลผลิตเยื่อที่ได้ แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติของเยื่อดังนี้

- Kappa number ตาม Tappi T 236 cm-85
- ความขาวสว่าง (Brightness) ตาม Scan C 11-75 และ ISO 2470
- ปริมาณของแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ที่ถูกใช้
- สมบัติทางกายภาพของเยื่อ โดยทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน ตาม Tappi T 205 om-88 (กระจายเยื่อที่ 10,000 รอบ) แล้วทดสอบ
    1. ความต้านแรงดึงขาด (Tensile strength) ตาม Tappi T 404 om-92
    2. ความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength) ตาม Tappi T 414 om-82
    3. ความต้านแรงดันทะลุ (Burst strength) ตาม Tappi T 403 om-85

โดยเก็บแผ่นทดสอบมาตรฐานไว้ในห้องควบคุมสภาวะการทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบที่สภาวะการทดสอบ :

อุณหภูมิ,องศาเซลเซียส 27 ± 1

ความชื้นสัมพัทธ์, ร้อยละ 65 ± 2

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 8 และ 9

3.2 การฟอกเยื่อในขั้นเปอร์ออกไซด์

การศึกษาผลของการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อต่อการลดค่า kappa number หรือปริมาณลิกนินในเยื่อ การเพิ่มค่าความขาวสว่าง โดยนำเยื่อที่ผ่านขั้นกรดมาฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการฟอกเยื่อฟางข้าวในขั้นเปอร์ออกไซด์ (AP)

การทดลอง (No)	ปริมาณกรดซัลฟูริก		ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์		Kappa no. (AP)	ความขาวสว่าง ร้อยละ	ความเหลือง หน่วย
	เลขรหัส	ร้อยละ	เลขรหัส	ร้อยละ			
1	-α	1.0	0	2.25	8.4	64.0	22.6
2	-1	1.608	-1	1.21	7.7	66.6	20.9
3	-1	1.608	-1	1.21	7.6	66.6	20.9
4	-1	1.608	+1	3.29	7.7	70.5	18.0
5	-1	1.608	+1	3.29	7.7	70.4	18.0
6	0	2.5	-α	0.5	7.6	64.7	20.4
7	0	2.5	0	2.25	7.0	69.1	18.1
8	0	2.5	0	2.25	7.1	69.2	18.0
9	0	2.5	0	2.25	7.0	69.3	18.1
10	0	2.5	0	2.25	7.1	69.1	18.0
11	0	2.5	0	2.25	7.0	69.1	18.1
12	0	2.5	0	2.25	7.1	69.0	18.2
13	0	2.5	0	2.25	7.1	69.1	18.0
14	0	2.5	0	2.25	7.0	69.1	18.1
* 15	0	2.5	+α	4.0	7.2	72.6	16.8
16	+1	3.392	-1	1.21	6.9	68.5	18.8
17	+1	3.392	-1	1.21	6.9	68.5	18.8
18	+1	3.392	+1	3.392	6.4	70.1	17.9
19	+1	3.392	+1	3.392	6.4	70.1	17.9
20	+α	4.0	0	2.25.0	6.4	69.3	19.4

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการลดค่า kappa no.หรือปริมาณลิกนินในเยื่อ ยกตัวอย่างเช่น จุดการทดลองที่ 6 และ 15 การเพิ่มปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากร้อยละ 0.5 เป็น 4.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง สามารถลดค่า kappa no. ได้เพียงเล็กน้อยโดยลดลงจาก 7.6 เป็น 7.2 แต่จะช่วยให้เยื่อมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 64.7 เป็นร้อยละ 72.6 และในขณะเดียวกันยังช่วยให้เยื่อมีความคงทนต่อการกลับสีเพิ่มขึ้น โดยดูจากค่าความเหลืองที่ลดลงจากร้อยละ 20.4 เป็น ร้อยละ 16.8 (ค่าความเหลืองเป็นตัวบ่งชี้ความคงทนต่อการกลับสีของเยื่อ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าเยื่อกลับสีได้ง่าย)

3.3 การฟอกเยื่อในขั้นไฮโปคลอไรท์

การศึกษาผลของการใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ในการฟอกเยื่อต่อการลดค่า kappa number หรือปริมาณลิกนินในเยื่อ การเพิ่มค่าความขาวสว่าง และสมบัติทางกายภาพของเยื่อที่ได้ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 8 และ9

ตารางที่ 8 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเยื่อฟางข้าวหลังผ่านการฟอกในขั้นไฮโปคลอไรท์ (APH)

No	ปริมาณกรดซัลฟูริก (A)		ปริมาณไฮโดรเจนเปอรออกไซด์ (P)		ปริมาณแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ (H)		ผลผลิตเยื่อ, ร้อยละ	ความขาวสว่าง ร้อยละ / ความเหลือง หน่วย
	เลขรหัส	ร้อยละ	เลขรหัส	ร้อยละ	เลขรหัส	ร้อยละ		
1	-α	1.0	0	2.25	0	2.25	98.6	77.5/13.0
2	-1	1.608	-1	1.21	-1	1.21	97.3	74.7/14.5
3	-1	1.608	-1	1.21	+1	3.29	97.6	77.8/12.8
4	-1	1.608	+1	3.29	-1	1.21	96.3	74.5/14.3
5	-1	1.608	+1	3.29	+1	3.29	98.3	78.6/12.2
6	0	2.5	-α	0.5	0	2.25	97.3	77.8/12.9
7	0	2.5	0	2.25	-α	0.5	99.0	73.9/15.3
8	0	2.5	0	2.25	+α	4.0	97.9	80.2/11.2
9	0	2.5	0	2.25	0	2.25	97.9	78.8/12.1
10	0	2.5	0	2.25	0	2.25	98.8	78.3/12.4
11	0	2.5	0	2.25	0	2.25	98.1	78.5/12.2
12	0	2.5	0	2.25	0	2.25	99.0	78.6/12.0
13	0	2.5	0	2.25	0	2.25	98.5	78.9/12.0
14	0	2.5	0	2.25	0	2.25	98.7	78.1/12.5
15	0	2.5	+α	4.0	0	2.25	98.0	78.6/12.0
16	+1	3.392	-1	1.21	-1	1.21	97.9	75.6/14.1
17	+1	3.392	-1	1.21	+1	3.29	98.0	78.5/12.4
18	+1	3.392	+1	3.29	-1	1.21	97.4	76.4/13.7
19	+1	3.392	+1	3.29	+1	3.29	98.2	78.6/13.3
20	+α	4.0	0	2.25	0	2.25	98.6	79.1/12.0

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้แคลเซี่ยมไฮโปคลอไรด์ มีผลต่อการเพิ่มของค่าความขาวสว่างในเยื่อได้มาก ยกตัวอย่างเช่น จุดการทดลองที่ 7 และ 8 การเพิ่มปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากร้อยละ 0.5 เป็น 4.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง สามารถเพิ่มค่าความขาวสว่างได้มาก โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 73.9 เป็น 80.2 และในขณะเดียวกันยังช่วยให้เยื่อมีความคงทนต่อการกลับสีเพิ่มขึ้น โดยดูจากค่าความเหลืองที่ลดลงจากร้อยละ 15.3 เป็น ร้อยละ 11.2 (ค่าความเหลืองเป็นตัวบ่งชี้ความคงทนต่อการกลับสีของเยื่อ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าเยื่อกลับสีได้ง่าย)

ตารางที่ 9 สมบัติทางกายภาพของเยื่อฟางข้าวหลังผ่านการฟอกในขั้นไฮโปคลอไรต์ (APH)

No	ปริมาณกรดซัลฟูริก (A)		ปริมาณไฮโดรเจนเปอรออกไซด์ (P)		ปริมาณแคลเซี่ยมไฮโปรคลอไรท์ (H)		ดัชนีความต้านแรงดึง, กิโลนิวตัน.เมตร/กิโลกรัม	ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด,นิวตันเมตร^2/กิโลกรัม	ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ, กิโลพาสคัล.เมตร^2/กรัม
	เลขรหัส	ร้อยละ	เลขรหัส	ร้อยละ	เลขรหัส	ร้อยละ			
1	-α	1.0	0	2.25	0	2.25	28.6	3.96	1.75
2	-1	1.608	-1	1.21	-1	1.21	26.5	3.48	1.67
3	-1	1.608	-1	1.21	+1	3.29	27.4	3.62	1.70
4	-1	1.608	+1	3.29	-1	1.21	28.3	3.90	1.70
5	-1	1.608	+1	3.29	+1	3.29	25.3	3.90	1.63
6	0	2.5	-α	0.5	0	2.25	28.6	3.12	1.58
7	0	2.5	0	2.25	-α	0.5	28.1	3.54	1.50
8	0	2.5	0	2.25	+α	4.0	28.0	3.00	1.55
9	0	2.5	0	2.25	0	2.25	28.5	3.22	1.67
10	0	2.5	0	2.25	0	2.25	26.4	3.52	1.77
11	0	2.5	0	2.25	0	2.25	27.6	3.31	1.67
12	0	2.5	0	2.25	0	2.25	26.6	3.22	1.55
13	0	2.5	0	2.25	0	2.25	28.6	3.31	1.67
14	0	2.5	0	2.25	0	2.25	26.6	3.22	1.55
15	0	2.5	+α	4.0	0	2.25	27.3	3.74	1.67
16	+1	3.392	-1	1.21	-1	1.21	25.2	3.14	1.44
17	+1	3.392	-1	1.21	+1	3.29	28.9	3.66	1.65
18	+1	3.392	+1	3.29	-1	1.21	29.2	3.65	1.82
19	+1	3.392	+1	3.29	+1	3.29	29.1	3.45	1.67
20	+α	4.0	0	2.25	0	2.25	23.3	3.31	1.22

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้แคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์มีผลทำให้ความแข็งแรงของเยื่อฟางข้าวลดลงเล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่น จุดการทดลองที่ 7 และ 8 การเพิ่มปริมาณการใช้แคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์จากร้อยละ 0.5 เป็น 4.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง สามารถทำให้ค่าดัชนีความต้านแรงดึง ดัชนีความต้านแรงฉีกขาดและดัชนีความต้านแรงดันทะลุลดลงจาก 28.1 กิโลนิวตัน.เมตร/กิโลกรัม , 35.4 นิวตันเมตร^2/กิโลกรัม และ 1.50 กิโลพาสคัล.เมตร^2/กรัม เหลือเพียง 28.0 กิโลนิวตัน.เมตร/กิโลกรัม, 3.00 นิวตันเมตร^2/กิโลกรัม และ 1.55 กิโลพาสคัล.เมตร^2/กรัมตามลำดับ ดังนั้นการใช้แคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์มากเกินไปนอกจากเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตแล้ว ยังทำให้เยื่อที่ได้มีความแข็งแรงลดลงด้วย

วิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การฟอกเยื่อในขั้นกรด

เยื่อที่นำมาใช้มี Kappa number เท่ากับ19.2 หรือคิดเป็นปริมาณลิกนินที่อยู่ในเยื่อ เท่ากับร้อยละ 2.88 (ปริมาณลิกนินในเยื่อ,ร้อยละ = 0.15 x Kappa number) และมีความขาวสว่างเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 37.8และความเหลือง 25.4 หน่วย เมื่อใช้กรดซัลฟูริกเป็นขั้นตอนแรกของการฟอกแทนการฟอกด้วยคลอรีนในขั้นคลอริเนชั่นสามารถลดปริมาณลิกนินในเยื่อลงได้มาก ตามผลการทดลองแสดงใน ตารางที่ 6 และหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{A Kappa number} = 11.787 - 0.157A - 0.0476A^2 \text{ ----------1)}$$

$$R^2 = 0.999$$

โดยที่ A = ปริมาณกรดซัลฟูริก หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

ในทำนองเดียวกันการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างกับปริมาณกรดซัลฟูริกดังสมการที่ 2

$$\text{A Brightness} = 46.424 + 0.142A + 0.09351\ A^2 \text{ ----------2)}$$

$$R^2 = 0.944$$

โดยที่ A = ปริมาณของกรดซัลฟูริก หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

4.2 การศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เยื่อหลังผ่านการฟอกขั้นกรดแล้วนำมาฟอกต่อ โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงร้อยละ 0.5-4.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง สามารถลด Kappa number ลงอยู่ในช่วง 6.4-8.4 และมีความขาวสว่างในช่วงร้อยละ 64.0 – 72.6 จะเห็นได้ว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าช่วยในการฟอกสามารถลดปริมาณลิกนินในเยื่อได้มากถึงร้อยละ 43.8-66.7 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7

เพื่อแสดงถึงอิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อการลดปริมาณลิกนิน ในเยื่อหรือ Kappa number จึงได้นำค่าทั้ง 2 มาหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 3

$$\text{AP Kappa number} = 9.208 - 0.897A - 2.792P + 1.207\ A^2 + 0.104\ P^2 + 0.546AP \text{-------3)}$$

$$R^2 = 0.976$$

โดยที่ A = ปริมาณของกรดซัลฟูริก หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

P = ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

ซึ่งจะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีอิทธิพลต่อการลดลงของลิกนินในเยื่อหรือ Kappa number

ในทำนองเดียวกันการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความขาวสว่างต่อกรดซัลฟูริกและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเราสามารถเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อได้ประมาณ 17.2 หน่วย ที่ความขาวสว่างร้อยละ 46.8 เป็นร้อยละ64.0 โดยใช้กรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 1.0 และ 2.25 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ

ภาควิทยาศาสตร์บริการ

$$\text{AP Brightness} = 53.576+6.974A + 3.425P - 0.909A^2 - 0.0275P^2 - 0.648AP \quad \text{----------4)}$$

$$R^2 = 0.854$$

โดยที่ A = ปริมาณของกรดซัลฟูริก หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

P = ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

5.2 การศึกษาขั้นกรด ขั้นเปอร์ออกไซด์และขั้นไฮโปคลอไรท์

จากเป้าหมายการฟอกเยื่อให้ได้ความขาวสว่างไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ผู้วิจัยจึงได้นำเยื่อที่ผ่านการฟอกขั้นกรด และขั้นเปอร์ออกไซด์แล้ว มาฟอกต่อด้วยแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ ซึ่งได้ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ดังนี้

5.2.1 ความขาวสว่าง

$$\text{APH brightness} = 66.762 + 2.304A - 0.414P + 5.061H - 0.329A^2 + 0.128P^2$$
$$- 0.716H^2 + 0.124AP + 0.0278PH - 0.137AH \quad \text{----------5)}$$

$$R^2 = 0.58$$

โดยที่ A = ปริมาณของกรดซัลฟูริก หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

P = ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

H = ปริมาณของแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

จากความสัมพันธ์ การใช้กรดซัลฟูริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ แคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์มีผลต่อการเพิ่มของความขาวสว่างมากโดยทำให้เยื่อที่มีความขาวสว่างสูงขึ้นมากกว่าระดับร้อยละ 75 ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ

5.2.2 การศึกษาสมบัติของเยื่อ APH

เนื่องจากผลการทดลองในขั้นไฮโปคลอไรท์ ซึ่งเป็นขั้นตอนการฟอกสุดท้ายนี้จะเป็นผลรวมอันเกิดเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆในแต่ละขั้นตอนการฟอกที่ผ่านมาด้วยเหตุนี้สมบัติของเยื่อที่ได้ในขั้นตอนนี้จึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่ง แต่จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งหมดของทุกขั้นตอนการฟอก ซึ่งสมบัติทางกายภาพของเยื่อฟางข้าวฟอกขาว สามารถแสดงความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Tensile index} = 47.677-4.557A - 9.602P-0.599A^2-1.080H^2+2.734AP+1.386AH \quad \text{----------6)}$$

$$R^2 = 0.61$$

$$\text{Burst index} = 7.249-1.809A - 1.986P-0.200H + 0.523AP+0.261AH \quad \text{----------7)}$$

$$R^2 = 0.75$$

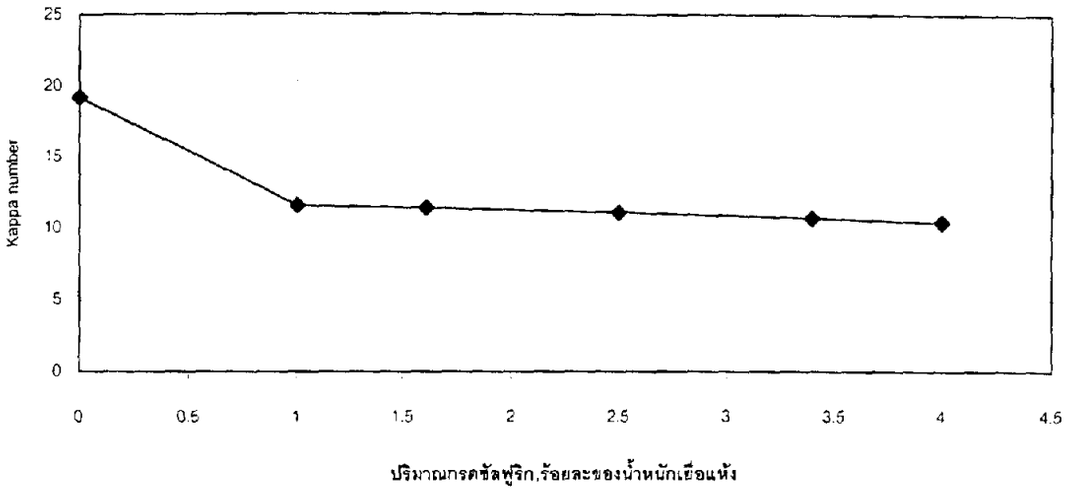
$$\text{Tear index} = 13.940-4.383A - 3.149P-0.273H+0.404A^2-o.360H^2+0.790AP+0.433AH \quad \text{-----8)}$$

$$R^2 = 0.73$$

โดยที่ A = ปริมาณของกรดซัลฟูริก หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

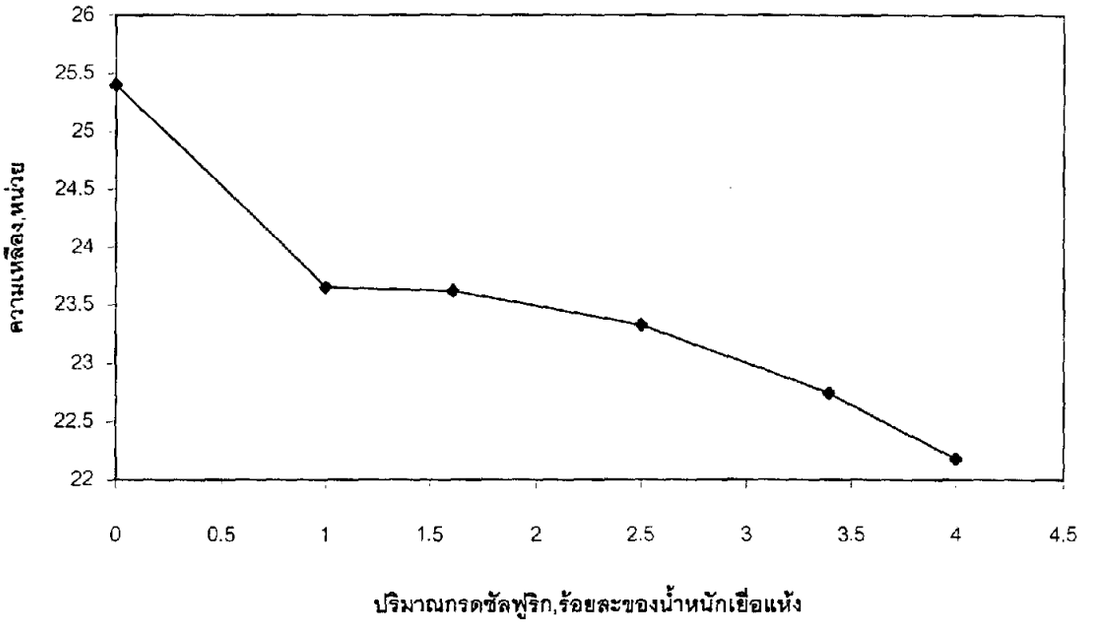
P = ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

H = ปริมาณของแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ หน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง



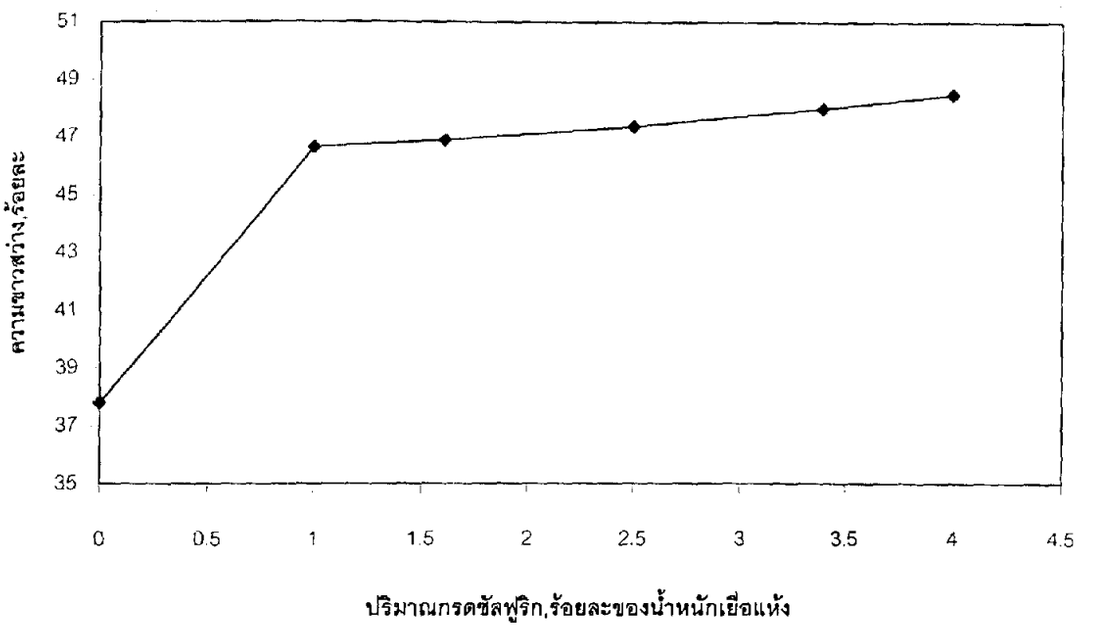
ภาพที่ 1 แสดงผลของกรดซัลฟูริกต่อ Kappa number ของเยื่อฟางข้าว

จากกราฟ เมื่อใช้กรดซัลฟูริกร้อยละ 4.0 ของน้ำหนักเยื่อออบแห้งค่าKappa number ของเยื่อฟางข้าวลดลงจาก 19.2 หน่วยเป็น 10.4 หน่วย



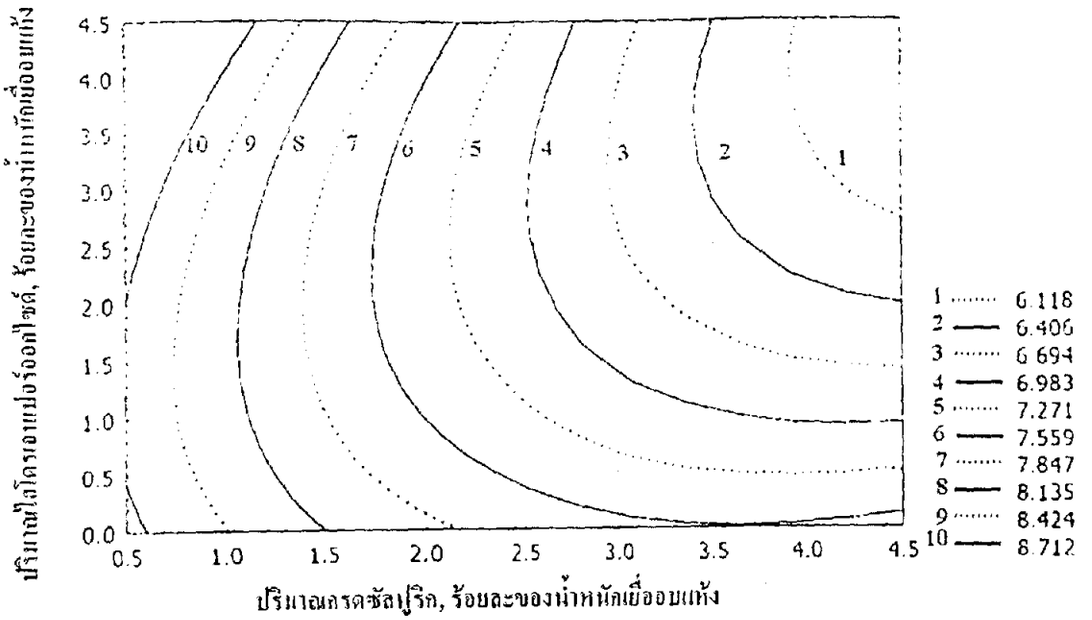
ภาพที่ 2 แสดงผลของกรดซัลฟูริกต่อความเหลืองของเยื่อฟางข้าว

จากกราฟ เมื่อใช้กรดซัลฟูริกร้อยละ 4.0 ของน้ำหนักเยื่อออบแห้งค่าความเหลืองของเยื่อฟางข้าวลดลงจาก 25.4 หน่วยเป็น 22.1 หน่วย



ภาพที่ 3 แสดงผลของกรดซัลฟูริกต่อความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าว

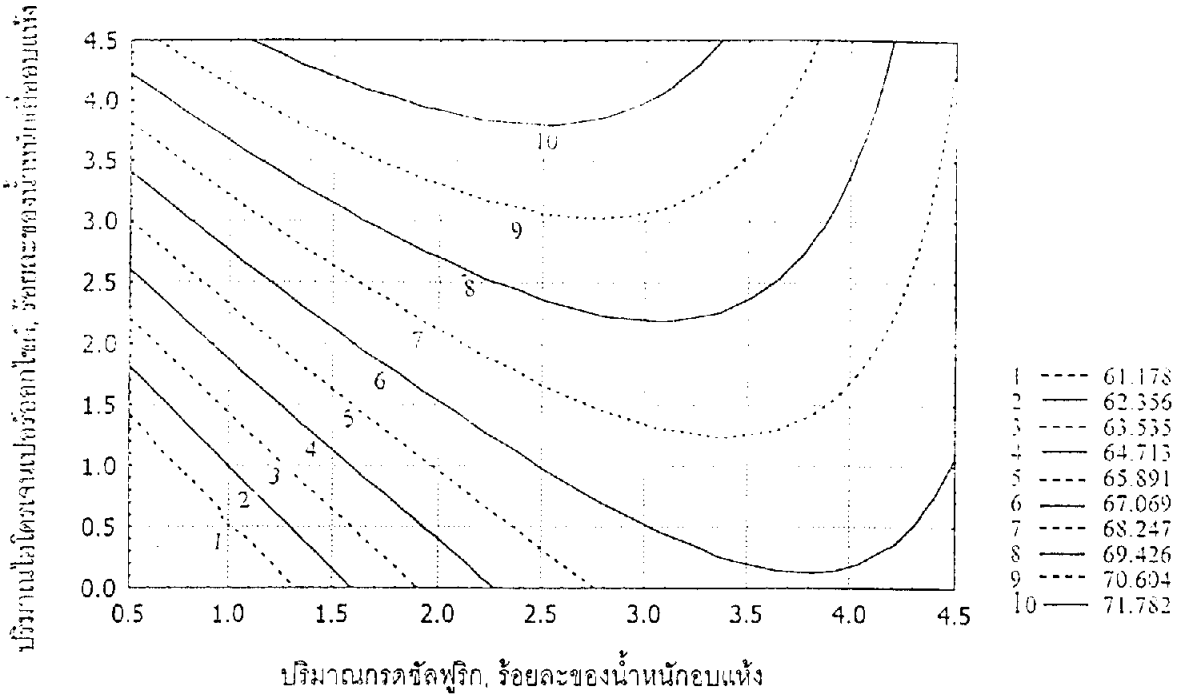
จากกราฟ เมื่อใช้กรดซัลฟูริกร้อยละ 4.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งค่าความขาวสว่างของเยื่อฟางข้าวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 37.8 เป็นร้อยละ 48.6



ภาพที่ 4 แสดงผลของกรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อKappa number

หมายเหตุ ทุก ๆ จุดบนเส้นที่ 1-10 จะมีค่า Kappa number เช่นเดียวกัน เช่น

- เส้นที่ 5 ทุก ๆ จุดมีค่า Kappa number เท่ากับ 7.271



ภาพที่ 5 แสดงผลของกรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความขาวสว่าง

หมายเหตุ ทุก ๆ จุด บนเส้นที่ 1-10 จะมีค่าความขาวสว่างเช่นเดียวกัน เช่น

- เส้นที่ 5 ทุก ๆ จุดมีค่าความขาวสว่าง เท่ากับร้อยละ 65.891

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. -**ขั้นการใช้กรดซัลฟูริก** แทนการใช้ขั้นคลอริเนชั่นปรากฏว่าสามารถลด kappa number ของเยื่อลงได้ 8.1 หน่วย (โดยที่ลดลงจาก 19.2 เป็น 11.1 ที่ center point) และช่วยเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อได้สูงขึ้นร้อยละ 9.7 (จาก 37.8 เป็น 47.5 ที่ center point No. 11) แสดงว่าสามารถนับไปประยุกต์ใช้ในกาคอุตสาหกรรมได้

2. **ขั้นเปอร์ออกไซด์**

2.1 เยื่อหลังผ่านขั้นกรดนำมาฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปรากฏว่าสามารถลด kappa number ของเยื่อลงได้ 4.1 หน่วย (โดยที่ลดลงจาก 11.1 เป็น 7.0 ที่ center point No. 9) และช่วยเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อได้สูงขึ้นร้อยละ 21.6 (จาก 47.5 เป็น 69.1 ที่ center point No. 11)

2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลในการช่วยลดค่าความเหลือง(yellowness)ของเยื่อเล็กน้อย

3. **ขั้นไฮโปคลอไรท์**

เยื่อฟางข้าวหลังจากฟอกด้วยแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์ ด้วยกระบวนการแบบปราศจากธาตุคลอรีน โดยแทนขั้นคลอริเนชั่นด้วยขั้นกรด แล้วฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วฟอกด้วยแคลเซี่ยมไฮโปคลอไรท์เป็นขั้นตอนสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 2.25 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ปรากฏว่าได้ความขาวสว่างไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ตามที่ต้องการ

คำขอบคุณ

การศึกษาวิจัยนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์เป็นอย่างดี มิได้เกิดขึ้นแต่ผู้วิจัยเพียงลำพัง แต่ได้รับความอนุเคราะห์และความร่วมมือเป็นอย่างดีจากทั้งผู้ร่วมงานและภาคเอกชน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอแสดงความขอบคุณต่อผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังนี้

1. บริษัท ไทยเปอร์ออกไซด์ จำกัด
2. บริษัท โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด
3. เจ้าหน้าที่ กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และ สมชาติ รุ่งอินทร์ : " การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟางข้าวนาปรังและนาปีในการทำเยื่อกระดาษ" รายงานการวิจัย ห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ต.ค. 2523
2. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และ คณะ : " การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อผสมฟางและหญ้าแบบสามขั้น" รายงานการวิจัย ห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ธ.ค. 2525
3. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ : " การศึกษาวิจัยเพื่อลดปริมาณการใช้คลอรีนในกระบวนการฟอก " รายงานการวิจัย กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ปี 2537
4. A. TEDER and A. TORNGREN , "Reduction of the formation of AOX in DC Bleaching by Addition of Chloride Ions." Jornal of pulp and paper science : vol.21 no. 3 March 1995
5. C. Rappe , S.Swansons , B.Glas,K.P.Kringstad,F.De Sousa , L.Johansson and Z.Abe. " On the formation 0f PCDDp and PCDDs in the bleaching of pulp " Pulp and Paper Canada 90:8 p T273-T278(1989)
6. Giertz, S.W.& Helle, P.Norsk Skoind. Vol. 14(11) ;1960 p 455
7. J.S. Hunter "EXPERIMENTAL DESIGNS FOR THE EXPLORATION AND EXPLOITATION OF RESPONSE SURFACES " Box, Princeton university Princeton ,New Jersey p 164-179
8. J. Willium Owens.,Human Health and Environmental Safety Procter & Gamble Paper Products " Assessing the environmental impact of pulping and bleaching operations". Bleach Plant Operation p 269-280(1991)

ภาคผนวก

คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

1. air dry weight(AD) น้ำหนักวัสดุแห้งเป็นน้ำหนักที่ได้เมื่อวางผึ่งไว้นานพอสมควรในอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ปกติ สำหรับเยื่อกระดาษจะมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10

2. grammage(basis weight) น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่มาตรฐาน มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร เรียกกันว่ากรัมกระดาษ ในปัจจุบัน ISO และ TAPPI ใช้คำว่า grammage แทน basis weight หมายถึง น้ำหนักตอหน่วยพื้นที่ที่เก็บรักษาในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ควบคุมตามมาตรฐานการทดสอบ สำหรับน้ำหนักมาตรฐานที่กำหนดยอมให้ค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนได้ร้อยละ 5 ถ้าเป็นกระดาษแข็งมีน้ำหนักมาก ๆ อาจลดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเหลือเพียงร้อยละ 3

3. consistency, percent ความข้นของน้ำเยื่อ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้งในน้ำเยื่อ

$$\text{consistency, \%} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่ออบแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่ออบแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100$$

เนื่องจากน้ำเยื่อไม่ได้เป็นสารละลายที่แท้จริง(true solution) จึงควรเรียก consistency ว่า " ความข้น " แทนคำว่า "ความเข้มข้น" ซึ่งหมายถึง concentration ของ true solution ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษแบ่งความข้นเป็น 3 ระดับ คือ low consistency(0-6 %), medium consistency(6-20 %) และ high consistency(20-40 %)

4. kappa number เป็นดัชนีบ่งชี้ปริมาณลิกนินที่เหลือในเยื่อ หมายถึง จำนวนมิลลิลิตรของด่างทับทิมความเข้มข้น 0.1 N ที่ทำปฏิกริยาพอดีกับเยื่อแห้ง 1 กรัม ตามสภาวะที่กำหนดตามมาตรฐาน kappa number มีสหสัมพันธ์ที่ดีกับ klason lignin เฉพาะในช่วงที่ผลผลิตเยื่อต่ำกว่าร้อยละ 70

5. klason lignin ปริมาณลิกนินในพืชหรือเยื่อหาได้โดยการแยกคาร์โบไฮเดรตออก โดยละลายในกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 72 klason lignin มีคุณสมบัติบางอย่างแตกต่างจากลิกนินในธรรมชาติโดยสิ้นเชิง klason lignin คือ acid insoluble lignin (TAPPI T 222)

6. lignin เป็นโพลิเมอร์ อสัณฐานประกอบด้วย phenyl propane unit เฉลี่ยประมาณ 2500 หน่วย จับตัวกันเป็นโครงร่างข่ายสามมิติด้วย ether bond (ส่วนใหญ่เป็น phenyl-o-aryl bond) และ C-C bond ลิกนินมีความเข้มข้นสูงที่สุดในส่วนเชื่อมต่อระหว่างเส้นใย(middle lamella) ทำหน้าที่การยึดเส้นใยให้ติดอยู่ด้วยกัน ลิก

นินมีคุณสมบัติเป็น thermoplastic อุณหภูมิที่อ่อนตัว(120-200 °C) ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น

7. brightness — ความขาวสว่างหมายถึง reflectivity ของแผ่นเยื่อหรือกระดาษวัดที่ช่วงคลื่นแสง 457 nm เปรียบเทียบกับ MgO[ISO 2469 ใช้ perfect reflecting diffuser] โดยถือว่า MgO มี reflectivity เป็น 100 % ความขาวสว่างเป็นสมบัติทางกายภาพโดยแท้ ไม่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะเกี่ยวกับสีได้ ค่าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับการกระจายแสง(light scattering) และการดูดซับแสง(light absorption) ของเยื่อเท่านั้น ฉะนั้นความขาวสว่างจึงเป็นค่าที่มีประโยชน์เฉพาะในการระบุคุณสมบัติของเยื่อฟอกหรืออีกนัยหนึ่งการวัดผลการฟอกเยื่อเท่านั้น แต่ยังไม่เพียงพอต่อการบ่งบอกความขาว(whiteness) ของกระดาษ การวัดค่าความขาวสว่างขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีหลายแบบแตกต่างกันในด้าน optical geometry เป็นสำคัญ อุปกรณ์วัดความขาวสว่างที่รู้จักกันดีได้แก่ Elrepho, และ photovolt ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือเหล่านี้แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ไม่สามารถระบุให้ถูกต้องแน่ชัดว่ามากน้อยเพียงใด

8. brightness reversion — การเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อได้แก่การที่เยื่อมีความขาวสว่างลดลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน การเสื่อมสภาพความขาวเกิดจากปัจจัยทางเคมีในตัวเยื่อเองและปัจจัยทางกายภาพจากภายนอก เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ และความร้อน

9. brightness reversion test — การทดสอบแนวโน้มในการเสื่อมสภาพความขาวของเยื่อ การทดสอบแบบธรรมชาติต้องใช้เวลานานมาก เช่น 1 ปี หรือ มากกว่านั้น ในทางปฏิบัติจึงทำการเร่งการเสื่อมสภาพหรือเรียกกันว่า accelerated aging test โดยสร้างสภาวะทางกายภาพที่รุนแรงกว่าปกติ ซึ่งคาดว่าจะมีผลต่อการเสื่อมสภาพตามความเป็นจริงในธรรมชาติ เช่น ใช้ความร้อน(dry heat) ความร้อนและความชื้นสัมพัทธ์สูง(wet heat) หรือแสงอุตราไวโอเล็ท การทดสอบแต่ละแบบเหมาะกับเยื่อแต่ละชนิด ซึ่งมีที่ใช้แตกต่างกัน

10. yellowness — เป็นค่าบอกถึงความเหลืองของเยื่อหรือกระดาษที่ความยาวคลื่น 457 nm

11. tensile strength — ความสามารถในการรับแรงดึงของกระดาษ ขึ้นอยู่กับการบดเยื่อและความดึงของกระดาษระหว่างที่ทำให้แห้ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ความต้านแรงดึงขาดลดลง การทดสอบค่า tensile strength ตามมาตรฐานทั่วไปใช้เครื่องทดสอบแบบลูกตุ้ม(pendulum type) การรายงานค่าควรรายงานเป็นหน่วยแรงที่มีความหมายคือ แรงต่อหน่วยความกว้างของกระดาษได้แก่ กิโลนิวตันต่อเมตร(kN/m) หรือ กิโลกรัมแรงต่อเซนติเมตร(kgf/cm) เนื่องจากกระดาษเป็นวัสดุที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ การรายงานต่อหน่วยแรงต่อพื้นที่หน้าตัดจึงไม่ถูก

ต้อง ในการทดสอบค่า tensile strength จะขึ้นอยู่กับระยะทดสอบ(test span) ความกว้างของชิ้นทดสอบและเวลาที่ใช้ดึงจนกระดาษขาด(time to rupture) การใช้ระยะทดสอบมากขึ้น หรือใช้เวลาในการดึงให้กระดาษขาดนานขึ้น จะทำให้ค่าที่ได้น้อยลง ถ้าระยะทดสอบ และเวลาเท่ากันเครื่องทดสอบแบบ pendulum และ constant straining rate จะให้ผลไม่แตกต่างกัน

12. tensile index — ดัชนีความต้านแรงดึงของเยื่อหรือกระดาษมีหน่วยเป็น kN.m/kg โดยคำนวณจาก

$$\text{tensile index} = \frac{\text{tensile strength}}{\text{grammage}}$$

13. tearing resistance, internal — ความต้านแรงฉีกขาดของกระดาษเมื่อเกิดรอยฉีกนำอยู่ก่อนแล้ว รายงานค่าเป็นหน่วยของแรง เช่น มิลลินิวตัน(mN) สมบัตินี้จำเป็นสำหรับกระดาษหลายชนิด รวมทั้งถุงบรรจุที่ปิดด้วยการเย็บ วัดด้วยเครื่องทดสอบแบบ Elmendorf ซึ่งอาศัยพลังงานกลจกลูกตุ้มซึ่งมีหลายขนาด ขนาดของลูกตุ้มบกเป็นหน่วยพลังงานต่อขีดบนสเกล เช่น 68.8 g.cm/div.(ขนาดเล็ก) หรือ 137.6 g.cm/div.(ขนาดกลาง) เครื่องมืออื่นก็มีแต่ไม่แพร่หลายนัก เช่น Brech-Imset

14. tear index — ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด มีหน่วยเป็น $N.m^2/kg$ คำนวณจาก

$$\text{tear index} = \frac{\text{tearing resistance}}{\text{grammage}}$$

15. bursting strength — ความต้านแรงดันทะลุ มีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ เช่น กิโลพาสคัล(kPa) หรือ กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร เครื่องทดสอบแรงดันทะลุที่แพร่หลายที่สุดคือ Mullen ในมาตรฐาน TAPPI SCAN และ ISO แบ่งแยกเครื่องทดสอบ Mullen สำหรับกระดาษและกระดาษแข็งออกจากกัน โดยมีความแตกต่างสำคัญที่ขนาดของปากจับชิ้นทดสอบ และ pumping rate ค่าแรงดันทะลุขึ้นอยู่กับการยืดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและการยืดตัวของกระดาษ ฉะนั้นโดยทั่วไปค่าแรงดันทะลุจึงสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแรงดึง

16. burst index — ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ มีหน่วยเป็น $kPa.m^2/g$ โดยคำนวณจาก

$$\text{burst index} = \frac{\text{bursting strength}}{\text{grammage}}$$