การใช้กากน้ำตาลเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่นในกระดาษรีไซเคิล

นางสาวเบญจนาถ เจริญสุข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USE OF MOLASSES COMPARED WITH OTHER DRY STRENGTH ADDITIVES IN RECYCLED PAPER

Miss Benjanart Charoensook

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology
Department of Imaging and Printing Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2016
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้กากน้ำตาลเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่นในกระดาษรีไซเคิล
โดย	นางสาวเบญจนาถ เจริญสุข
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สีหนาท ประสงค์สุข)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด)

เบญจนาถ เจริญสุข : การใช้กากน้ำตาลเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่นในกระดาษรีไซเคิล (USE OF MOLASSES COMPARED WITH OTHER DRY STRENGTH ADDITIVES IN RECYCLED PAPER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ, 83 หน้า.

กากน้ำตาลเป็นผลพลอยได้จากขั้นตอนท้ายสุดของกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย มีราคาถูก สามารถเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับกระดาษได้ เนื่องจากมีน้ำตาลซูโครส ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้กับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเยื่อกระดาษ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเปรียบเทียบผลของการใช้กากน้ำตาลแทนสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษกับสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่นในกระดาษรีไซเคิล ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน โดยทำการทดสอบสมบัติของกระดาษ ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงฉีก ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน ความต้านทานการโค้งงอ ความเรียบ และความต้านทานอากาศไหลผ่าน การทดลองเริ่มต้นจากการหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิด โดยใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ร้อยละ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แป้งประจุบวกร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และไคโตซานร้อยละ 0.25 0.50 0.75 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากการทดลองพบว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน ได้แก่ ร้อยละ 0.7 2.0 และ 0.75 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองโดยใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่า การใช้กากน้ำตาลสามารถเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษได้ ยกเว้นความต้านทานแรงฉีก ซึ่งความแข็งแรงของกระดาษยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณกากน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยปริมาณของกากน้ำตาลที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติกระดาษที่ได้จากการใช้กากน้ำตาลกับสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่น พบว่า ความแข็งแรงของกระดาษที่ได้จากการใช้กากน้ำตาลนั้นยังด้อยกว่าการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่น โดยสารเพิ่มความแข็งแรงที่ให้ผลดีที่สุด คือ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

Chulalongkorn University

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....

ปีการศึกษา 2559

5772238023 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY
KEYWORDS: MOLASSES / DRY STRENGTH PROPERTIES / DRY STRENGTH ADDITIVE

BENJANART CHAROENSOOK: USE OF MOLASSES COMPARED WITH OTHER DRY STRENGTH ADDITIVES IN RECYCLED PAPER. ADVISOR: PH. D. KUNTINEE SUVARNAKICH, 83 pp.

Molasses is a by-product from the last stage of sugar production process. Molasses which is cheap can improve some strength properties of paper since it contains sucrose which can form hydrogen bonds with cellulose and hemicelluloses in the pulp. The objective of this study was to compare the use of molasses as dry strength additives to other dry strength additives in recycled paper such as cationic polyacrylamide (cPAM), cationic starch, and chitosan. Paper properties such as tensile strength, tear resistance, ring crush, bending stiffness, smoothness and air resistance were examined . The experiment was started by determining the optimal dosage for each dry strength additive. The amounts of 0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7% and 1.0% based on oven dried (O.D.) pulp weight were examined for cPAM while the amounts of 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% and 2.5% based on O.D. pulp weight were investigated for cationic starch. The dosages of 0.25%, 0.50%, 0.75% and 1.0% based on O.D. pulp weight were analyzed for chitosan. It was discovered that the optimal dosages for cPAM, cationic starch and chitosan were 0.7%, 2.0% and 0.75% based on O.D. pulp weight, respectively. Then, the molasses was used with the dosages of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% based on O.D. pulp weight. The results showed that molasses could improve strength properties of paper except tear resistance. These strengths increased with higher dosages of molasses. The optimal dosage of molasses was 20% based on O.D. pulp weight since it provided the best paper strengths. However, paper strengths obtained by adding molasses were not comparable to those obtained from other dry strength additives. The best results were found when cPAM was added into the paper.

Department:	Imaging and Printing Technology	Student's Signature	....
		Advisor's Signature	....
Field of Study:	Pulp and Paper Technology		
Academic Year:	2016		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากคณาจารย์และหน่วยงานต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ทั้งคำแนะนำทางวิชาการตลอดจนตรวจแก้ไขความเรียบร้อยในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด กรรมการ (ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก) ในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำในการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ต้นฉบับให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) บริษัท เคมีร่า (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท เนชั่นแนล สตาร์ช แอนด์ เคมิเคิล (ประเทศไทย) จำกัด และ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากร ในสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ และสาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ ขอขอบคุณเพื่อนๆสมาชิกในหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์เสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ทั้งยังคอยสนับสนุนและให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยจนกระทั่งมีวันนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ

กิตติกรรมประกาศ...ฉ

สารบัญ...ช

สารบัญภาพ ....ญ

สารบัญตาราง...ฐ

บทที่ 1 บทนำ..1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย...2

1.4 ขั้นตอนการทดลอง 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ...3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง...4

2.1 กระดาษ..4

2.1.1 ส่วนที่เป็นเส้นใย 4

2.1.2 ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย...5

2.2 ชนิดของเส้นใย..5

2.2.1 เส้นใยจากไม้ยืนต้น (Wood fiber)..5

2.2.2 เส้นใยจากไม้ล้มลุก (Non-wood fiber)...7

2.3 ลักษณะและโครงสร้างของเส้นใย 7

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย 8

2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)..9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)....10
2.4.3 ลิกนิน (Lignin)....10
2.4.4 สารแทรก (Extractive)....11
2.5 กระดาษรีไซเคิล....12
2.5.1 ลักษณะเส้นใยของกระดาษรีไซเคิล....13
2.5.2 ข้อดีของการรีไซเคิลเยื่อกระดาษ....14
2.6 กระดาษลูกฟูก (Corrugated board)....14
2.7 สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ....16
2.7.1 แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์....17
2.7.2 แป้งประจุบวก....18
2.7.3 ไคโตซาน....19
2.8 กากน้ำตาล....21
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย....26
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง....26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง....26
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย....29
3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากน้ำตาล....29
3.3.2 การเตรียมเยื่อกระดาษ....29
3.3.3 การเตรียมสารละลาย....29
3.3.4 การเตรียมน้ำเยื่อ....30
3.3.5 การขึ้นแผ่นกระดาษ....31
3.3.6 การทดสอบสมบัติของกระดาษ....32

หน้า

3.3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ....36
3.3.8 การวิเคราะห์ความคุ้มทุนของวัตถุดิบ....36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล....38
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากน้ำตาล....38
4.2 ปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่เหมาะสม....39
4.3 ปริมาณกากน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง....50
4.4 เปรียบเทียบผลของปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งและกากน้ำตาลที่เหมาะสม .60
4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มทุนของวัตถุดิบ....69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ....71
5.1 สรุปผลการวิจัย....71
5.2 ข้อเสนอแนะ....72
รายการอ้างอิง....73
ภาคผนวก....77
ภาคผนวก ก....78
ภาคผนวก ข....80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....83

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 ภาพเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของไม้เนื้อแข็ง (บน) และไม้เนื้ออ่อน (ล่าง) 6

ภาพที่ 2-2 ลักษณะโครงสร้างของผนังเส้นใย...8

ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของเซลลูโลส...9

ภาพที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส 10

ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของลิกนิน 11

ภาพที่ 2-6 ขนาดของลอนลูกฟูก 15

ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ 17

ภาพที่ 2-8 โครงสร้างของแป้ง (a) และเซลลูโลส (b)...18

ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของแป้งประจุบวก 19

ภาพที่ 2-10 โครงสร้างของเซลลูโลส ไคติน และไคโตซาน..20

ภาพที่ 2-11 โครงสร้างของไคโตซานที่ได้มาจากปฏิกิริยาดีอะซิทิเลชัน (deacetylation) ของไคติน...20

ภาพที่ 2-12 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส 21

ภาพที่ 2-13 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ 23

ภาพที่ 3-1 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบรวดเร็วโดยวิธี Rapid Köthen...31

ภาพที่ 3-2 เครื่องวัดแรงดึงในแนวตั้ง...32

ภาพที่ 3-3 เครื่องวัดแรงฉีกขาดของกระดาษ...33

ภาพที่ 3-4 เครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน 34

ภาพที่ 3-5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของกระดาษต่อการโค้งงอ 34

ภาพที่ 3-6 เครื่องทดสอบการซึมผ่านลมของกระดาษ..35

ภาพที่ 3-7 เครื่องวัดค่าความเรียบของกระดาษ..36

หน้า

ภาพที่ 3-8 แผนผังการทดลองการเตรียมน้ำเยื่อ การเตรียมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง การขึ้นแผ่นทดสอบ และการทดสอบสมบัติกระดาษ...37

ภาพที่ 4-1 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...40

ภาพที่ 4-2 ความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง 41

ภาพที่ 4-3 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...41

ภาพที่ 4-4 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...43

ภาพที่ 4-5 ความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...43

ภาพที่ 4-6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...44

ภาพที่ 4-7 แผ่นทดสอบที่ใช้แป้งประจุบวกร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...45

ภาพที่ 4-8 แผ่นทดสอบที่มี Formation ที่ดี 45

ภาพที่ 4-9 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง 46

ภาพที่ 4-10 ความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...47

ภาพที่ 4-11 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง 48

ภาพที่ 4-12 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่ม 50

ภาพที่ 4-13 ค่าความหนาของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง 52

ภาพที่ 4-14 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่ม 53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ภาพที่ 4-15 ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง......54

ภาพที่ 4-16 ค่าความความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง......55

ภาพที่ 4-17 ความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง......57

ภาพที่ 4-18 ความต้านทานอากาศของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง......58

ภาพที่ 4-19 ความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง...59

ภาพที่ 4-20 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น......60

ภาพที่ 4-21 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น......62

ภาพที่ 4-22 ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาล......63

ภาพที่ 4-23 ความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น......64

ภาพที่ 4-24 ความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น......65

ภาพที่ 4-25 ความต้านทานอากาศของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่นๆ......67

ภาพที่ 4-26 ความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น......67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ชนิดของลอนลูกฟูก.....15

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของกากน้ำตาลในงานวิจัยต่างๆ.....22

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกากน้ำตาล.....38

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....40

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....41

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....41

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....43

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....43

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....44

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....47

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหนของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....47

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง.....48

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง.....51

หน้า

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง 53

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง 55

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง 56

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานอากาศไหลผ่านของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง 58

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง 59

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง 61

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 61

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง 62

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง 64

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง 65

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านอากาศไหลผ่านของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง....66

ตารางที่ 4.24 ร้อยละความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สารเพิ่มความแข็งแรง....69

ตารางที่ 4.25 ราคาและปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดต่างๆ....69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันได้มีการหันมาใช้กระดาษรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ วัน เป็นผลให้มีปริมาณการใช้กระดาษที่เพิ่มขึ้นตาม อีกทั้งได้มีความกังวลในเรื่องของสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากกระบวนการการผลิตกระดาษที่เพิ่มขึ้นตามมา แต่เนื่องด้วยกระดาษรีไซเคิลนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความแข็งแรงที่ลดลง ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษรีไซเคิล ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการที่จะเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษวิธีหนึ่ง คือ การตีเยื่อ (Beating) หรือบดเยื่อ (Refining) โดยการตี/บดเยื่อนั้นจะไปเพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใย ส่งผลให้พันธะระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังมีการเกิดเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) เพิ่มขึ้น ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กในปริมาณที่ไม่มากเกินไปจะช่วยเพิ่มพันธะให้มากขึ้นเช่นกัน อีกวิธีหนึ่งในการที่จะเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ คือการใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง (Dry strength additives) ลงไปในกระดาษ ซึ่งสารเพิ่มความแข็งแรงในขณะแห้งดังกล่าวนั้น จะไปช่วยเพิ่มพันธะระหว่างเส้นใย คุณสมบัติของสารเพิ่มความแข็งแรงที่เหมาะสมสำหรับกระดาษนั้นควรที่จะ ละลายน้ำได้ มีความสามารถในการกักเก็บเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีประสิทธิภาพ เข้ากันได้กับผิวหน้าเซลลูโลสเพื่อที่จะไม่ไปรบกวนพันธะไฮโดรเจน และจะต้องไม่เป็นพิษ ย่อยสลายได้ เพื่อที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม สารเพิ่มความแข็งแรงสำหรับกระดาษที่นิยมใช้กัน ได้แก่ พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA), แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic polyacrylamine, cPAM), แป้งประจุบวก (Cationic starch), พอลิอะมิโดเอมีน อีพิคลอโรไฮดริน เรซิน (Polyamidoamine epichlorohydrine resins, PAE) ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose) และ ไคโตซาน (Chitosan)

จากการศึกษาค้นคว้าโดย Fahmy T.[1] และโดย Ashori A. และคณะ[2] พบว่ากากน้ำตาลนั้นสามารถที่จะเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษได้ โดยกระดาษที่ใส่กากน้ำตาลมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความยาวเมื่อขาด สูงกว่ากระดาษที่ไม่มีการใส่กากน้ำตาล ซึ่งกากน้ำตาลนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากท้ายสุดของกระบวนการการผลิตน้ำตาลทรายเป็นของเหลวสีน้ำตาลถึงสีน้ำตาลเข้ม มีลักษณะข้นเหนียว มีกลิ่นเฉพาะตัวและมีรสหวาน สามารถละลายน้ำได้ ส่วนประกอบของกากน้ำตาลจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืชที่นำมาผลิตเป็น

น้ำตาลทราย โดยในหลายๆ ประเทศได้มีการใช้กากน้ำตาลในทางปศุสัตว์ ซึ่งกากน้ำตาลนั้นไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมใดๆ

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยจึงมีความต้องการในการที่จะศึกษาการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษรีไซเคิลที่ผลิตจากกระดาษกล่องลูกฟูกเก่า (Old corrugated container, OCC) เปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรงที่มีใช้ทั่วไป ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic polycarylamine, cPAM), แป้งประจุบวก (Cationic starch) และไคโตซาน (Chitosan) โดยใช้สารเพิ่มความแข็งแรงในปริมาณที่เหมาะสมตามแต่ละชนิด

1.2 วัตถุประสงค์

เปรียบเทียบผลของการใส่กากน้ำตาลแทนสารเพิ่มความแข็งแรงในกระดาษขณะแห้งกับสารเพิ่มความแข็งแรงในกระดาษขณะแห้งชนิดอื่น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือ มุ่งเน้นศึกษาและทำการเปรียบเทียบผลของการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่น ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน ซึ่งจะเตรียมสารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิดที่ 4 ระดับ เพื่อทำการหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิด โดยความเข้มข้นของสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษแต่ละชนิดจะอยู่ในช่วงความเข้มข้นที่บริษัทของสารเคมีชนิดนั้นๆ แนะนำมา โดยที่แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เตรียมในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แป้งประจุบวกเตรียมที่ปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และไคโตซานเตรียมที่ปริมาณร้อยละ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยกระดาษรีไซเคิลที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ กระดาษทำผิวกล่อง (Linerboard) และกระดาษทำลอนลูกฟูก (Corrugating medium) ซึ่งจะทำการใช้กากน้ำตาลในปริมาณที่ต่างกัน 5 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่เลือกทำการเปรียบเทียบได้แก่ ความเรียบ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงฉีก ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน ความต้านทานการโค้งงอ และความต้านทานอากาศไหลผ่าน

1.4 ขั้นตอนการทดลอง

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูล

1.4.2 ศึกษาวิธีการทดลอง เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และวางแผนการทดลอง

1.4.3 เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง

1.4.3.1 เตรียมเยื่อสำหรับการทดลอง เตรียมโดยใช้กระดาษทำผิวกล่อง (Linerboard) และกระดาษทำลอนลูกฟูก (Corrugating medium)

1.4.3.2 เตรียมกากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงในกระดาษขณะแห้งชนิดอื่นๆ ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic polyacrylamide, cPAM) แป้งประจุบวก (Cationic starch) และ ไคโตซาน (Chitosan) โดยศึกษาวิธีการเตรียมสารเติมแต่งเพิ่มความแข็งแรงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติกระดาษขณะแห้ง

1.4.3.3 นำสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งแต่ละตัวมาใส่ในน้ำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 1.4.3.1 แล้วตีกระจายให้เข้ากัน

1.4.4 นำน้ำเยื่อที่มีสารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิดมาขึ้นแผ่นกระดาษ (Handsheet) ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบวิธี Rapid Köthen

1.4.5 นำกระดาษที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษ ได้แก่ ความพรุน (Porosity) ความเรียบ (Smoothness) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance) ความคงรูปของกระดาษ (Bending stiffness) และความต้านทานแรงกดแนววงแหวน (Ring crush resistance)

1.4.6 เปรียบเทียบสมบัติของกระดาษที่ได้จากกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งในกระดาษชนิดต่างๆ

1.4.7 วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง เขียนวิทยานิพนธ์ และเผยแพร่ผลงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลการเปรียบเทียบการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษกับสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่นๆ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษาเรื่อง “การใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ” ประกอบไปด้วย แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระดาษ เส้นใย สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ และกากน้ำตาล รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กระดาษ

ในกระบวนการผลิตกระดาษ เยื่อกระดาษถือเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ โดยเยื่อกระดาษคือส่วนของเส้นใยที่ได้มาจากพืช โดยกระบวนการจะเริ่มต้นจากการตัดต้นไม้ที่มีอายุและขนาดตามต้องการ ลำเลียงเข้าสู่โรงงานในลักษณะของท่อนไม้ แล้วจะเข้าสู่กระบวนการปอกเปลือก จากนั้นสับย่อยไม้ให้มีขนาดเล็กก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษต่อไป โดยในกระบวนการผลิตกระดาษ สามารถแบ่งวัตถุดิบหลักที่สำคัญได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous materials) และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (Non-fibrous materials) [3] ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้ คือ

2.1.1 ส่วนที่เป็นเส้นใย

เยื่อที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เยื่อบริสุทธิ์ (Virgin pulp) และเยื่อรีไซเคิล (Recycled pulp or secondary pulp) ดังนี้

1) *เยื่อบริสุทธิ์*

เป็นเยื่อที่ได้จากการแปรรูปพืชหรือต้นไม้ด้วยกระบวนการต่างๆ เพื่อให้ได้มาเป็นเส้นใยหรือเยื่อกระดาษเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตกระดาษ โดยชื่อเรียกเยื่อกระดาษที่ได้จะแตกต่างกันออกไปตามกระบวนการผลิตเยื่อ เช่น เยื่อที่ได้จากการใช้พลังงานกลหรือกระบวนการทางกลจะเรียกว่า เยื่อเชิงกล (Mechanical pulp) เยื่อที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับเส้นใยหรือใช้กระบวนการทางเคมีจะเรียกว่า เยื่อเคมี (Chemical pulp)

2) *เยื่อรีไซเคิล*

ได้มาจากการแปรรูปกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยจะนำกระดาษดังกล่าวนั้นมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อแยกเส้นใยออกจากกัน แล้วนำกลับมาผลิตเป็นกระดาษเพื่อใช้ประโยชน์อีกครั้ง ปกติแล้วการที่นำกระดาษมารีไซเคิล สามารถทำได้สูงสุดประมาณ 4-6 ครั้ง เพราะเยื่อที่ผ่านการรีไซเคิลแล้วจะมีขนาดที่สั้นลง และมีคุณภาพด้อยลง ซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณภาพกระดาษที่ผลิต

2.1.2 ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย

นอกเหนือไปจากเส้นใยหรือส่วนที่เป็นเยื่อกระดาษแล้ว องค์ประกอบของกระดาษที่สำคัญได้แก่ สารเติมแต่ง ซึ่งสารเติมแต่งเป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงไปในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้ได้สมบัติตามการใช้งาน [4, 5] โดยสารเติมแต่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) สารเติมแต่งเพื่อหน้าที่เฉพาะอย่าง (Functional additives) – เป็นสารเคมีที่เติมไปในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อทำหน้าที่ในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งานของกระดาษแต่ละชนิด เช่น ตัวเติม (Filler) สารต้านการซึมน้ำ (Sizing agent) สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง (dry strength additive) สารเพิ่มความแข็งแรงขณะเปียก (wet strength additive) และ สีย้อม (dyes) เป็นต้น

2) สารเติมแต่งเพื่อควบคุมการผลิต (Chemical processing aids) – เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในกระบวนการผลิตเพื่อช่วยให้สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เฉพาะอย่างนั้นทำหน้าที่ได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีส่วนในการดูแลรักษาความสะอาดเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท คือ สารเพิ่มการตกค้าง (Retention aids) สารต้านการเกิดฟอง (Defoamers) สารควบคุมจุลินทรีย์ (Microbiological control agent) สารควบคุมการเกิดจุดด่าง (Pitch control agent) สารช่วยระบายน้ำ (Drainage aids) และ สารช่วยกระจายตัว (Formation aids)

2.2 ชนิดของเส้นใย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

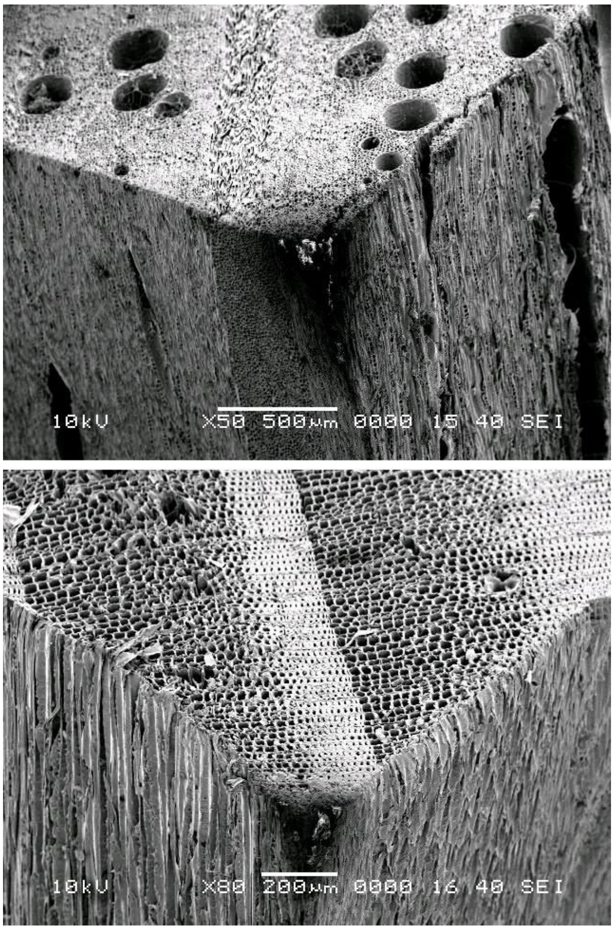
โดยทั่วไป พืชที่ใช้เป็นแหล่งของเส้นใยในกระบวนการผลิตนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ไม้ยืนต้น (Wood fiber) และไม้ล้มลุก (Non-wood fiber) [3] ดังนี้คือ

2.2.1 เส้นใยจากไม้ยืนต้น (Wood fiber)

เส้นใยจากไม้ยืนต้นนั้นเป็นแหล่งวัตถุดิบเยื่อที่สำคัญในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เนื่องจากไม้ยืนต้นให้ผลผลิตเยื่อที่ได้ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งคุณภาพของกระดาษที่ได้มาจากการผลิตด้วยเส้นใยจากไม้ยืนต้นก็มีคุณภาพดี มีความแข็งแรงสูง สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น กระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ และกระดาษพิมพ์เขียน เป็นต้น เส้นใยจากไม้ยืนต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ดังนี้คือ

1) ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) – เป็นไม้ยืนต้นที่เจริญเติบโตในแถบพื้นที่เขตหนาว ไม้ประเภทนี้โตช้าและไม่ผลัดใบ ใบของไม้เนื้ออ่อนจะมีลักษณะแคบ เรียวยาว เป็นรูปเข็ม จัดเป็นไม้สน (Coniferous) หรือพืชเมล็ดเปลือย (Gymnosperm) เช่น สน (Pine) สปรู๊ซ (Spruce)

พืชประเภทนี้ให้เส้นใยที่มีความแข็งแรง เยื่อกระดาษที่ได้จะเรียกว่า เยื่อใยยาว (long fiber) ซึ่งเยื่อประเภทนี้หากนำมาผลิตเป็นกระดาษแล้ว จะส่งผลให้กระดาษที่ได้นั้นมีความแข็งแรงสูง จึงนิยมนำเยื่อประเภทนี้มาผลิตเป็นกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ ภาพที่ 2-1 แสดงโครงสร้างภายในของไม้เนื้ออ่อน



ภาพที่ 2-1 ภาพเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของไม้เนื้อแข็ง (บน) และไม้เนื้ออ่อน (ล่าง)
ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Hardwood [6]

2) ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) – เป็นไม้ยืนต้นที่เจริญเติบโตในแถบพื้นที่เขตร้อน ไม้ประเภทนี้โตเร็ว โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นไม้ผลัดใบ ใบของไม้เนื้อแข็งจะมีลักษณะใบกว้าง จัดเป็นพืชที่เมล็ดมีรังไข่ห่อหุ้ม (Angiosperm) เช่น ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) เบิร์ช (Birch) และแอสเพน (Aspen) เป็นต้น พืชประเภทนี้จะให้เส้นใยที่มีลักษณะเล็ก ละเอียด ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ เยื่อกระดาษที่ได้จะเรียกว่า เยื่อใยสั้น ซึ่งหากนำเยื่อใยสั้นมาผลิตเป็นกระดาษแล้ว จะให้กระดาษที่มีผิว

เรียบ จึงส่งผลให้มีความนิยมนำมาผลิตกระดาษสำหรับการพิมพ์และการเขียน ภาพที่ 2-1 แสดงโครงสร้างภายในของไม้เนื้อแข็ง

2.2.2 เส้นใยจากไม้ล้มลุก (Non-wood fiber)

ในปัจจุบัน ไม้ล้มลุกถือได้ว่าเป็นแหล่งของเส้นใยที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ เพราะสามารถใช้ทดแทนเส้นใยจากไม้ยืนต้นได้ เนื่องจากว่าไม้ยืนต้นนั้นใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตนาน จึงทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนเส้นใยที่ใช้สำหรับกระบวนการผลิตกระดาษ จึงได้มีการนำเส้นใยประเภทอื่นมาทดแทน ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของพืชหรือไม้ล้มลุกที่เป็นแหล่งเส้นใยได้ดังนี้ [7, 8]

ก) วัสดุเหลือทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น

ข) พืชที่ขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไผ่ หญ้าแฝก เป็นต้น

ค) พืชล้มลุกตามฤดูกาล เช่น ป่าน ปอ ใบสับปะรด เป็นต้น

ง) พืชที่ให้เส้นใยจากผลและเมล็ด เช่น ผ้าย ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

2.3 ลักษณะและโครงสร้างของเส้นใย

พืชชั้นสูงจะมีผนังเซลล์ที่แข็งแรงเพื่อให้สามารถรับแรงดันของของเหลวภายในได้ ซึ่งผนังของเส้นใยจะประกอบไปด้วยผนังย่อยๆ 4 ชั้น [9, 10] ดังแสดงในภาพที่ 2-2 และมีรายละเอียดดังนี้คือ

1) ผนังชั้นที่หนึ่ง (Primary wall layer; P) ผนังชั้นนี้ค่อนข้างบาง มีความหนาประมาณ 0.1-0.2 ไมครอน มีองค์ประกอบของน้ำประมาณร้อยละ 90 ไมโครไฟบริลเรียงตัวเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบ ผนังชั้นนอกสุดของเส้นใยแต่ละเส้นจะเชื่อมติดกันด้วยชั้นบางๆ ที่เรียกว่า มิดเดิล ลาเมลลา (Middle lamella)

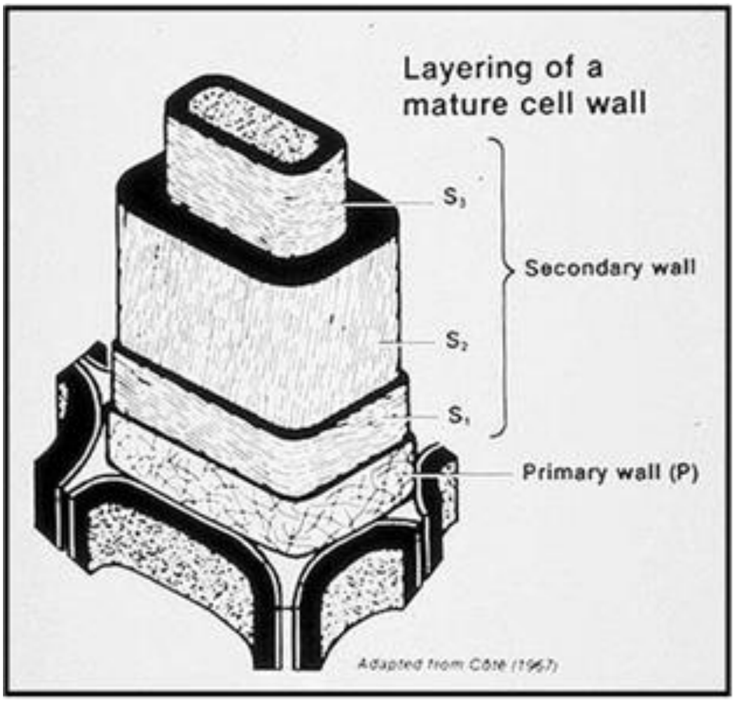
2) ผนังชั้นที่สอง (Secondary wall layer; S) ผนังในชั้นนี้จะหนามากกว่าผนังชั้นนอก โดยมีไมโครไฟบริลซ้อนทับกันหลายชั้น ในผนังชั้นที่สองนี้จะประกอบไปด้วยผนังย่อยอีก 3 ชั้น ที่มีลักษณะต่างกัน โดยในแต่ละชั้นนั้นจะมีการยึดตัวซ้อนกันอย่างแน่นหนาของไมโครไฟบริลที่มีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งชั้นต่างๆ ออกได้ดังนี้

2.1) Outer secondary wall layer (S_1) ผนังในชั้นนี้จะมีความหนาใกล้เคียงกับผนังชั้นที่หนึ่ง โดยโครงสร้างจะประกอบด้วยไมโครไฟบริลเรียงซ้อนกันเป็นแผ่นบาง 4-6 แผ่น โดยไมโครไฟบริลจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเกลียวหรือแบบบันไดเวียน (Spiral)

2.2) Middle secondary wall layer (S_2) ผนังชั้นนี้จะอยู่ถัดจากชั้น S1 เข้าไปข้างใน โดยเป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุด คือหนาประมาณ 10-30 ไมครอน หรือประมาณร้อยละ 70-90 ของความหนาในผนังชั้นที่สอง โครงสร้างของชั้นนี้ไมโครไฟบริลจะเรียงซ้อนกันเป็นแผ่นบาง 150

แผ่น มีการเรียงตัวกันเป็นก้นหอย (Helix) และในผนังชั้นนี้จะมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงที่สุด ดังนั้นผนังชั้นนี้จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อเส้นใยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ

2.3) Inner secondary wall layer (S_3) หรือ Tertiary wall โดยผนังชั้นนี้จะอยู่ถัดเข้าไปข้างใน มีความหนาประมาณร้อยละ 2-8 ของความหนาในผนังชั้นที่สอง ลักษณะโครงสร้างคือไมโครไฟบริลเรียงซ้อนทับกันเป็นแผ่นบางประมาณ 12 แผ่น ในทิศทางที่ขนานกับไมโครไฟบริลของชั้น S_2 แต่ 4 แผ่นสุดท้ายในสุดไมโครไฟบริลจะเรียงในทิศทางเกือบตั้งฉากกับแนวแกนตามความยาวของเส้นใย



ภาพที่ 2-2 ลักษณะโครงสร้างของผนังเส้นใย

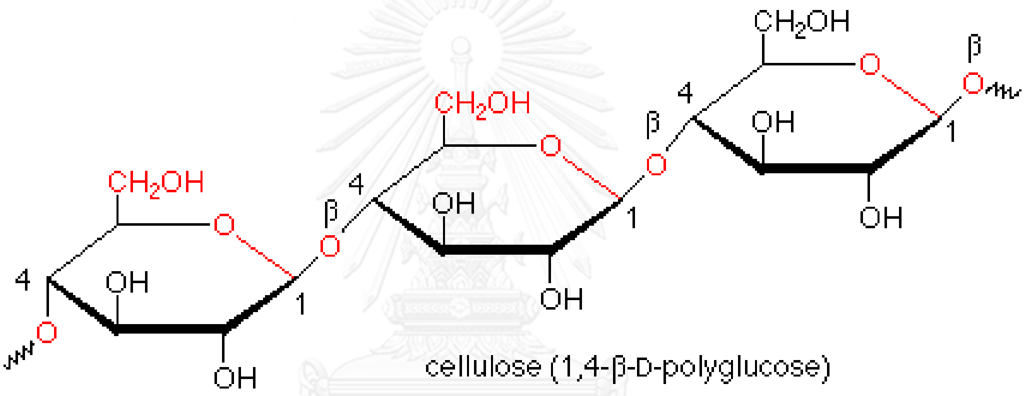
ที่มา: http://sci.waikato.ac.nz [11]

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และ สารแทรก (Extractive) ดังนี้คือ

2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารจำพวกพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) มีโครงสร้างป็นเส้นตรง (Linear chain) ประกอบไปด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-ไกลโคซิดิก (β-1,4 glycosidic linkage) ซึ่งจะส่งผลต่อความเหนียวและความแข็งแรงของเส้นใย โดยแต่ละโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสจะเชื่อมต่อกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 (C1) และคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 (C4) ของโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 2-3 โดยทั่วไประดับการเกิดพอลิเมอไรเซชั่น (Degree of polymerization; DP) ของเซลลูโลสจะเกิดจากการรวมกันของหน่วยกลูโคสประมาณ 1000-3000 หน่วย มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ แต่มีความสามารถในการดูดน้ำ โดยละลายได้ดีในกรดเกลือและกรดกำมะถันเข้มข้น

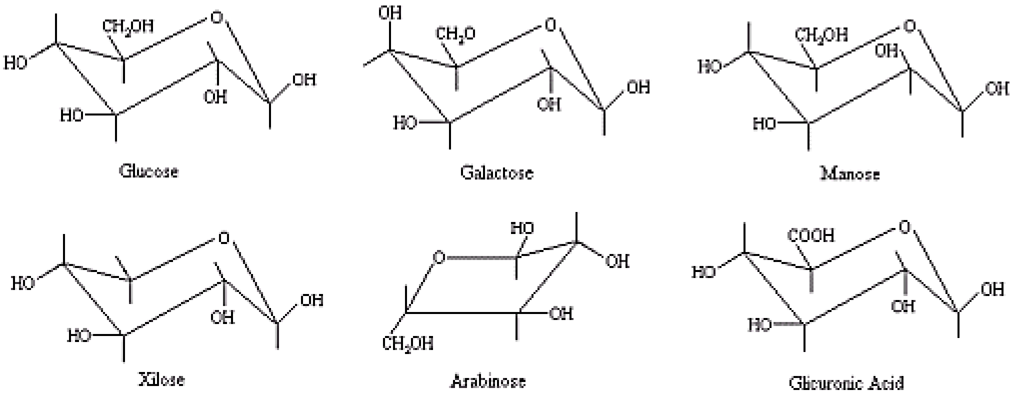


ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของเซลลูโลส
ที่มา: http://chemistry2.csudh.edu/rpendarvis/dipolysacch.html [12]

เซลลูโลสมีลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ แบบผลึก (Crystalline region) และ แบบอสัณฐาน (Amorphous region) โดยทั่วไปโครงสร้างของเซลลูโลสแบบผลึกนั้นจะมีการจัดเรียงตัวของกลูโคสด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างเป็นระเบียบ โครงสร้างแบบผลึกจึงมีความแข็งแรงและความต้านทานต่อการซึมผ่านของสารเคมีหรือตัวทำละลายสูงกว่าโครงสร้างแบบอสัณฐานที่โมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบอสัณฐานน้อยกว่าโครงสร้างแบบผลึก จึงส่งผลให้สารเคมีหรือตัวทะลายต่างๆ เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านจับกันหลวมๆ เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นน้ำตาลเกาะกันคล้ายเซลลูโลส แต่ประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่แตกต่างกัน 5 ประเภท คือ กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) ไซโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) อะราบิโนส (Arabinose) รวมทั้งกรดกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) และกรดกลูคูโลนิก (Gluculonic acid) ด้วย (ดังแสดงในภาพที่ 2-4) เฮมิเซลลูโลสมีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$



ภาพที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: http://www.cheresearch.engin.umich.edu/savage/energy.html [13]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

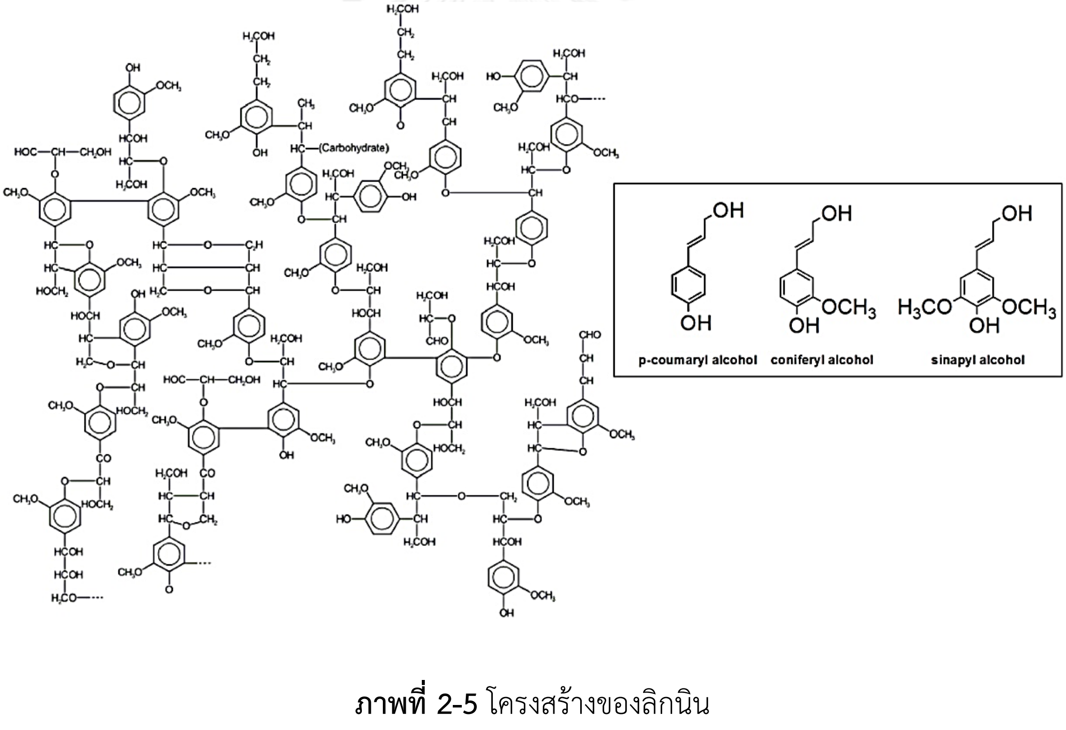
โดยปกติแล้วจะพบเฮมิเซลลูโลสอยู่ปะปนกับเซลลูโลสและสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะทำหน้าที่เป็นสารยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกันรวมถึงทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับเส้นใย โดยที่เฮมิเซลลูโลสนั้นจะละลายในตัวทำละลายและเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน มีการเกาะกันแบบหลวมๆ และเมื่อนำเส้นใยไปตีกระจายแล้วน้ำจะเข้าไปในเส้นใยได้ง่าย ส่งผลให้เส้นใยนั้นอุ้มน้ำได้ดี เส้นใยมีการพองตัว แล้วผิวของเส้นใยจึงเกิดการแตกแขนงออก จึงทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจนขึ้น ดังนั้นเยื่อจึงมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น [14]

2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครสร้างที่ซับซ้อนประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานที่มีโครงสร้างวงแหวนของเฟนนิลโพรเพน (Phenylpropane) แม้ลิกนินใน

พืชจะไม่มีโครงสร้างที่แน่นอนชัดเจน แต่ลิกนินมีโครงสร้างจากหน่วยพื้นฐาน 3 ส่วน คือ พาราคูมาริล แอลกอฮอล์ (p-Coumaryl alcohol) ซินาพิล แอลกอฮอล์ (Sinapyl alcohol) และ คอนนิเฟอริล แอลกอฮอล์ (Coniferyl alcohol) ดังแสดงในภาพที่ 2-5

โดยทั่วไปแล้วลิกนินไม่ละลายในน้ำ และมีโครสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเนื่องจากไม่มีส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งลิกนินนั้นสามารถที่จะเกิดพันธะโควาเลนต์กับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เป็นสารประกอบลิกนินคาร์โบไฮเดรต (Lignin-carbohydrate complex) และลิกนินนั้นมีหน้าที่เปรียบเสมือนกาวที่เชื่อมเส้นใย ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดลิกนินหรือทำให้ลิกนินอ่อนตัวในกระบวนการผลิตกระดาษ เพื่อแยกเส้นใยออก อีกทั้งลิกนินนั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับความชื้นและแสง ซึ่งส่งผลให้เยื่อและกระดาษกลายเป็นสีเหลือง ฉะนั้นหากต้องการเยื่อและกระดาษที่มีความขาวสูงจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการฟอกเยื่อ เพื่อกำจัดลิกนินที่หลงเหลืออยู่และเพื่อเป็นการเพิ่มความขาวสว่าง (Brightness) ให้แก่เยื่อ



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: Lignin biodegradation with laccase-mediator systems [15]

2.4.4 สารแทรก (Extractive)

สารแทรกเป็นส่วนประกอบในไม้ล้มลุกหรือไม้ยืนต้นที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvents) เช่น อะซีโตน (Acetone) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และ

แอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นต้น ซึ่งสารแทรกบางประเภทจะมีผลเสียต่อการผลิตเยื่อกระดาษหากสภาวะการผลิตไม่เหมาะสม [16]

2.5 กระดาษรีไซเคิล

ปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษนั้น เป็นปัญหาหลักที่ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษหลายแห่งต้องหาแนวทางในการแก้ปัญหา การขาดแคลนดังกล่าว ทั้งการปลูกต้นไม้เพื่อทดแทนการขาดแคลนจากการถูกทำลาย การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือการนำพืชล้มลุกมาใช้แทนเส้นใยจากไม้ยืนต้น หรือการนำกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการกระจายเส้นใยและทำความสะอาดเยื่อเพื่อนำเยื่อนั้นมาผลิตเป็นกระดาษอีกครั้ง โดยจะเรียกเยื่อกระดาษที่ผ่านกระบวนการนี้ว่า เยื่อรีไซเคิล (Recycled pulp) โดยกระบวนการในการผลิตเยื่อรีไซเคิลในแต่ละโรงงานนั้นก็จะแตกต่างกันออกไป เช่น ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษรีไซเคิลสำหรับบรรจุภัณฑ์อาจไม่มีขั้นตอนการฟอกสีเยื่อ ในขณะที่กระบวนการผลิตเยื่อสำหรับกระดาษพิมพ์เขียนจำเป็นที่จะต้องมีขั้นตอนการฟอกสีเยื่อ เป็นต้น

การที่จะนำเยื่อรีไซเคิลมาผลิตกระดาษนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่ ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าวนี้ส่งผลต่อคุณภาพของกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อชนิดนี้ เพราะในกระบวนการรีไซเคิลกระดาษจะมีการใช้แรงกลในการแยกเส้นใยซึ่งส่งผลทำให้เส้นใยถูกทำลายและมีความยาวลดลง นอกจากนี้ยังเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Hornification ซึ่งคือการที่เส้นใยสูญเสียความสามารถในการดูดน้ำ หรือค่า Water retention value (WRV) ซึ่งถือเป็นการสูญเสียที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ปรากฏการณ์ Hornification นี้เกิดจากการที่เส้นใยถูกทำให้แห้งตัวในระหว่างการผลิตกระดาษรอบแรก เส้นใยเกิดการหดตัวและมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ทำให้เส้นใยมีลักษณะกระด้างและอุ้มน้ำได้น้อยลง เมื่อนำเส้นใยเหล่านี้มาใช้ใหม่ เส้นใยจึงไม่สามารถรับน้ำได้ดีนัก ทำให้ไม่สามารถแนบตัวหรือสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยรอบข้างได้ดีเท่าที่ควร กระดาษที่ผลิตจากเยื่อรีไซเคิลจึงอ่อนแอเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อบริสุทธิ์หรือเยื่อที่ได้จากต้นไม้โดยตรง ซึ่งในปัจจุบันเยื่อรีไซเคิลนิยมนำมาผลิตเป็นกระดาษแข็งสำหรับบรรจุภัณฑ์ (Paperboard for packaging) โดยเฉพาะผลิตเป็นกระดาษทำผิวกล่อง (Linerboard) ในกระดาษลูกฟูก

โดยทั่วไปแล้วกระดาษที่มักใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อรีไซเคิลนั้น แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก คือ [17]

1. กระดาษหนังสือพิมพ์
2. กล่องกระดาษลูกฟูก
3. กระดาษสำนักงาน

4. อื่นๆ

กระดาษรีไซเคิลแต่ละชนิดก็จะมีสมบัติและองค์ประกอบที่ต่างกัน เช่น ปริมาณเยื่อหรือสารปนเปื้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเติมแต่งพิเศษต่างๆ ในกระดาษแต่ละชนิดด้วย ดังนั้นจึงทำให้การเลือกชนิดกระดาษที่จะนำมาผลิตเยื่อกระดาษรีไซเคิลจึงมีความสำคัญอย่างมาก

2.5.1 ลักษณะเส้นใยของกระดาษรีไซเคิล

กระบวนการรีไซเคิลกระดาษนั้นมีการใช้แรงกลในการแยกเส้นใย เป็นผลให้เส้นใยถูกทำลายไป ดังนั้นกระดาษที่ผลิตจากเยื่อรีไซเคิลจะมีสมบัติอ่อนแอเมื่อเทียบกับสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อบริสุทธิ์โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะนำเยื่อรีไซเคิลไปผลิตเป็นกระดาษที่คุณภาพต่ำกว่ากระดาษถูกนำมารีไซเคิล นอกจากนี้สมบัติของเยื่อกระดาษรีไซเคิลยังขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตอีกด้วยว่ากระดาษนั้นเป็นกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเคมีหรือเยื่อเชิงกล ซึ่งเยื่อแต่ละประเภทนี้เมื่อมีการนำมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลก็จะให้ลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนี้ [16]

1) เยื่อเคมีรีไซเคิล (Recycled chemical pulp fiber) – ได้มาจากการนำกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเคมีมาผ่านกระบวนการต่างๆ ในกระบวนการผลิตเยื่อรีไซเคิล เยื่อที่ผลิตได้จะมีลักษณะดังนี้

- เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยก่อนรีไซเคิลแล้วความแข็งแรงของเส้นใยจะลดลง
- ความสามารถในการพองตัวของเส้นใยลดลงทำให้เส้นใยดูดซับน้ำได้น้อยลง
- กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเคมีรีไซเคิลมีความหนาแน่นต่ำ
- การคืนตัวของเส้นใยจะเกิดขึ้นได้น้อยเมื่อนำเส้นใยไปแช่น้ำภายหลังจากการทำให้แห้ง โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Hornification

2) เยื่อเชิงกลรีไซเคิล (Recycled mechanical pulp fiber) – ได้มาจากการนำกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลมาผ่านกระบวนการต่างๆ ในกระบวนการรีไซเคิล เยื่อที่ผลิตได้จะมีลักษณะดังนี้

- เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยก่อนรีไซเคิลแล้วความแข็งแรงของเส้นใยจะดีขึ้น
- ความสามารถในการพองตัวของเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยดูดซับน้ำได้ดีขึ้น
- กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลรีไซเคิลมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น

การเกิดปรากฏการณ์ Hornification นั้นจะเกิดขึ้นมากในกระบวนการผลิตเยื่อเคมีรีไซเคิลแต่เกิดขึ้นน้อยในกระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลรีไซเคิล เนื่องจากในกระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลรีไซเคิลนั้นมีปริมาณของลิกนินหลงเหลืออยู่มากกว่าเยื่อเคมีรีไซเคิล ซึ่งลิกนินจะเข้าไปขัดขวาง

การเกิด Hornification ทำให้โอกาสในการเกิด Hornification ในเยื่อเชิงกลรีไซเคิลมีน้อยกว่าการเกิดในเยื่อเคมีรีไซเคิล โดยในเยื่อเชิงกลรีไซเคิลนั้นยังสามารถรับน้ำหลังจากการอบแห้งได้

2.5.2 ข้อดีของการรีไซเคิลเยื่อกระดาษ

การรีไซเคิลกระดาษมีข้อดี คือ ลดปริมาณการตัดต้นไม้และการใช้ทรัพยากรป่าไม้ ลดปริมาณการใช้น้ำในการผลิตเยื่อกระดาษ ลดปริมาณขยะที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระดาษ ช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมถึงช่วยลดมลภาวะที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น

2.6 กระดาษลูกฟูก (Corrugated board)

กระดาษลูกฟูก ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ กระดาษทำผิวกล่อง (Linerboard) และกระดาษทำลอนลูกฟูก (Corrugating medium) ดังรายละเอียดต่อไปนี้ [18]

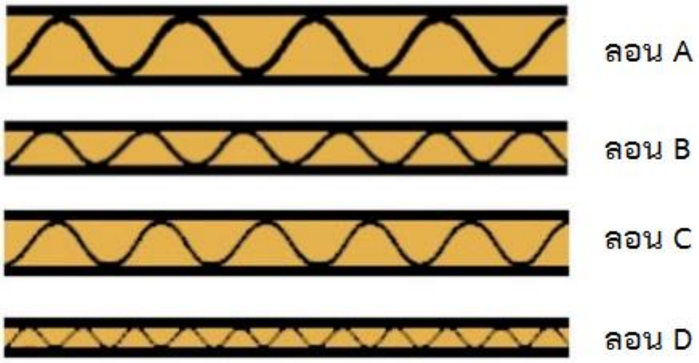
1) กระดาษทำผิวกล่อง

ในการผลิตกระดาษผิวกล่องหากส่วนใหญ่ใช้เยื่อบริสุทธิ์ จะเรียกว่า Kraftliner ซึ่งจะมีการใช้เยื่อใยยาวเป็นส่วนประกอบหลัก แต่หากในการผลิตมีการผสมเยื่อใยสั้นหรือเยื่อรีไซเคิลด้วยนั้น จะเรียกว่า Testliner ซึ่งจะผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 20 โดยกระดาษผิวกล่องนี้จะใช้ประกบด้านบนและด้านล่างของลอนลูกฟูก

2) กระดาษทำลอนลูกฟูก

ในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูกนั้นนิยมใช้เยื่อกึ่งเคมีและเยื่อรีไซเคิล แต่ส่วนใหญ่แล้วมักใช้กระดาษรีไซเคิลในการผลิตมากกว่า แต่เนื่องจากเยื่อรีไซเคิลมีคุณภาพต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ เพื่อให้กระดาษมีสมบัติด้านความแข็งแรงที่ดีขึ้น ซึ่งกระดาษทำลอนลูกฟูกนี้จะนำมาขึ้นเป็นลอนอยู่ระหว่างกระดาษผิวกล่อง เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการโค้งงอและแรงกดจากทุกทิศทาง โดยลอนลูกฟูกมีหลายแบบซึ่งจะแตกต่างกันที่ความสูงและความกว้างของลอน ดังภาพที่ 2-6 และตารางที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2-6 ขนาดของลอนลูกฟูก

ที่มา: brainpacking.com [19]

ตารางที่ 2.1 ชนิดของลอนลูกฟูก

ชนิด	**ความสูงของลอน (มิลลิเมตร)**	**จำนวนลอน/เมตร**	**คุณสมบัติ**
ลอน A	4.0 - 4.8	105 – 125	เหมาะกับสินค้าที่ต้องการรับน้ำหนักการเรียงซ้อนมาก และไม่เน้นการพิมพ์
ลอน B	2.1 - 3.0	150 – 185	เหมาะกับสินค้าที่รับน้ำหนักได้ด้วยตัวเอง เช่น กระป๋องเหล็ก
ลอน C	3.2 - 3.9	120 – 145	เป็นที่นิยมใช้มาก เหมาะกับสินค้าทั่วๆไป ที่รับน้ำหนักได้ปานกลาง
ลอน E	1.0 – 1.8	290 - 320	รองรับการพิมพ์ได้ดีที่สุด เหมาะกับกล่องไดคัทขนาดเล็ก หรือกล่องออฟเซ็ท

ที่มา: https://sites.google.com/site/brrcuphanthklxngkradas/3-kar-xxkbaeb-klxng-kradas-phab [20]

ชนิดของกระดาษลอนลูกฟูกสามารถแบ่งได้ตามชั้นของกระดาษ ซึ่งมีอยู่ 4 ประเภท คือ

1) กระดาษลูกฟูกหน้าเดียว (Single face) ประกอบไปด้วยกระดาษผิวกล่อง 1 ชั้น และกระดาษลอนลูกฟูก 1 ชั้น นิยมใช้กันกระแทกสินค้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) กระดาษลูกฟูก 3 ชั้น (Single wall) ประกอบไปด้วย กระดาษผิวกล่อง 2 ชั้น ประกบกับกระดาษลอนลูกฟูกตรงกลาง 1 ชั้น มักใช้กับสินค้าที่มีน้ำหนักปานกลางหรือไม่เน้นความแข็งแรงมาก

3) กระดาษลูกฟูก 5 ชั้น (Double wall) ประกอบไปด้วย กระดาษผิวกล่อง 3 ชั้น ประกบกับกระดาษลอนลูกฟูก 2 ชั้น โดยกระดาษลอนลูกฟูกที่อยู่ติดกับผิวกล่องด้านนอกจะเป็นลอน B เพื่อประโยชน์ทางการพิมพ์ และกระดาษลอนลูกฟูกที่อยู่ด้านในจะเป็นลอน C เพื่อประโยชน์ทางด้านการรับแรงกระแทก นิยมใช้สำหรับสินค้าที่ต้องการการป้องกันสูง หรือมีน้ำหนักมาก

4) กระดาษลูกฟูก 7 ชั้น (Triple wall) ประกอบไปด้วยกระดาษผิวกล่อง 4 ชั้น และกระดาษลอนลูกฟูก 3 ชั้น เป็นกระดาษลอนลูกฟูกที่นิยมผลิตเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมหนักที่ต้องรับน้ำหนักบรรจุที่ปริมาณมาก

2.7 สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ

ความแข็งแรงของกระดาษนั้นขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยว (Individual fibers) จำนวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย การกระจายตัวของเส้นใย รวมถึงการเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยยาว การเลือกใช้ชนิดของเยื่อ (เยื่อเคมีมีความแข็งแรงกว่าเยื่อเชิงกล) การลดปริมาณการใช้ตัวเติม (Fillers) หรือการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ (Dry strength additives) เป็นต้น

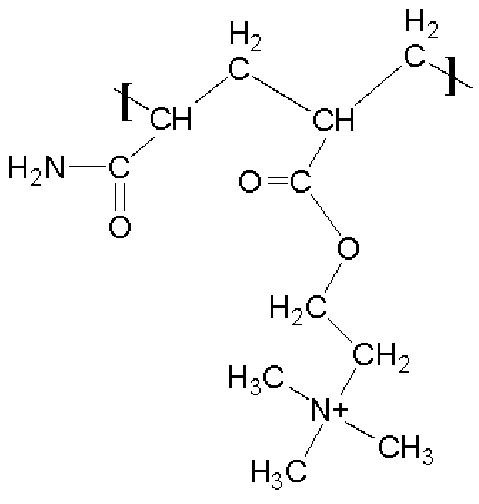
โดยทั่วไปการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษสามารถทำได้โดยวิธีเชิงกล เช่น การตีหรือบดเยื่อ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและเพิ่มการดูดน้ำของเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความอ่อนตัว (Flexibility) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยสามารถแนบตัวกันได้ดีมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงดีขึ้นด้วย ในขณะที่สารเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษนั้น เป็นสารเคมีที่ใส่ผสมลงในน้ำเยื่อระหว่างการผลิตกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในกระดาษหลังจากกระดาษแห้งตัวแล้ว โดยไปช่วยเพิ่มจำนวนพันธะระหว่างเส้นใย ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการถอนผิวหน้ากระดาษ เพิ่มความคงรูป ลดการเกิดขุยกระดาษ (Linting) และลดการเกิดฝุ่น (Dusting) สารเพิ่มความแข็งแรงนั้นควรที่จะมีสมบัติดังนี้ [21]

1. มีความสามารถในการละลายน้ำเพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการผลิตกระดาษ
2. มีความสำคัญต่อเซลลูโลสในการที่จะกักเก็บเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. มีความเข้ากันได้กับผิวหน้าของเซลลูโลสเพื่อที่จะไม่รบกวนพันธะไฮโดรเจน
4. ต้องปลอดสารพิษและสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่นิยมใช้กันมีดังนี้

2.7.1 แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

เอไมด์ กรุ๊ป (Amide group) ในตัวพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นตัวที่ค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยาในการที่จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ส่งผลให้จำนวนพันธะไฮโดรเจนมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพอลิอะคริลาไมด์นั้นมีหลายมวลโมเลกุล (Molecular weight) และหลายระดับกิ่งก้านสาขา (Branching) ให้เลือกใช้ โดยขนาดของพอลิอะคริลาไมด์ควรจะต้องยาวพอสมควรที่จะถูกดูดซับที่ผิวหน้าของเส้นใย และให้พื้นที่หรือบริเวณที่จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ซึ่งได้มีการพัฒนา แอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Anionic polyacrylamide) ขึ้นมา แต่การใช้แอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์จะต้องมีการใส่อลัม (Alum) เพื่อช่วยในการยึดติดด้วย ซึ่งต่อมาก็ได้มีการพัฒนาแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ขึ้น ข้อดีคือไม่ต้องใส่อลัมลงไปในกระบวนการผลิต โดยโครงสร้างของแคตไออนิกพอลิอะคริลาไมด์ดังแสดงในภาพ 2-7



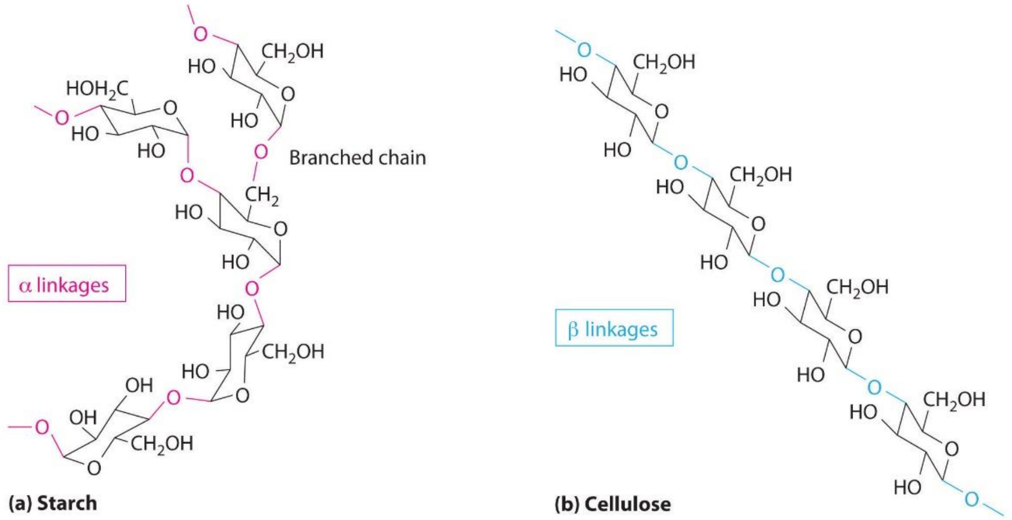
ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

ที่มา: Martin Hubbe [22]

แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่สังเคราะห์ขึ้นมาด้วยวิธีการทางเคมี เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทางกลให้กระดาษ โดยเมื่อมีการเติมลงไปในน้ำเยื่อแล้วจะไปเพิ่มพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ให้กับเส้นใยในโครงสร้างกระดาษ และส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น นอกจากจะมีหน้าที่ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษที่ผลิตขึ้นแล้ว แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ยังทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มการกักเก็บ (Retention aids) ในกระบวนการผลิตกระดาษได้อีกด้วย

2.7.2 แป้งประจุบวก

โครงสร้างของแป้งมีลักษณะคล้ายเซลลูโลส คือ มีกลูโคสเป็นหน่วยย่อยเหมือนกัน โดยจะสร้างพันธะกันที่ตำแหน่งคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 เหมือนกัน แต่ในเซลลูโลสนั้นจะมีพันธะเป็น β-1,4 glycosidic linkage และพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรงคล้ายริบบิ้น ส่วนแป้งจะมีพันธะเป็น α-1,4 glycosidic linkage และพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นขด ดังแสดงในภาพที่ 2-8

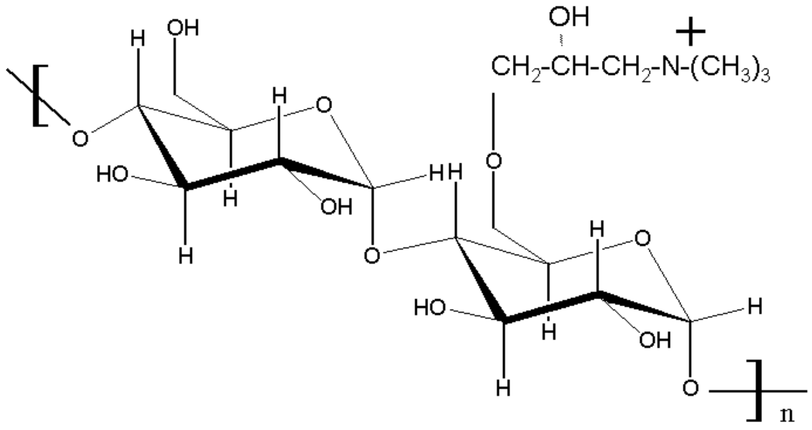


ภาพที่ 2-8 โครงสร้างของแป้ง (a) และเซลลูโลส (b)

ที่มา: https://saylordotorg.github.io/text_general-chemistry-principles-patterns-and-applications-v1.0/s28-06-the-molecules-of-life.html [23]

โครงสร้างของแป้งมีกลูโคสเป็นหน่วยย่อย มีลักษณะเป็นเม็ดหรือผงขนาดเล็กๆ ซึ่งอาจผลิตมาจาก เช่น ข้าวโพดและข้าวสาลี หรืออาจผลิตมาจากบริเวณราก เช่น มันสำปะหลัง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำแป้งธรรมชาติ (Native starch) ไปใช้ในอุตสาหกรรม ยังมีข้อจำกัดอยู่มาก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ เช่น ในเรื่องของความหนืดที่ไม่เหมาะสม ความไม่คงตัว หรือขนาดที่แตกต่างกันของแกรนูล (granule) เป็นต้น ต่อมาจึงทำการพัฒนาแป้งดัดแปร (Modified starch) ที่อาจได้จากกระบวนการทางเคมี กายภาพ หรือการใช้เอนไซม์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเข้าไปยับยั้งสมบัติเดิมของแป้งธรรมชาติ แล้วสร้างสมบัติใหม่ขึ้นมา ซึ่งทำให้สมบัติของแป้งนั้นตรงตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรมมากกว่า

ในอุตสาหกรรมกระดาษ แป้งประจุบวกจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดี เนื่องจากมีการดัดแปรโดยการเพิ่มประจุเข้าไป ดังแสดงในภาพที่ 2-9 แป้งประจุบวกจะมีความเสถียรมากขึ้น มีอัตราการคืนตัวลดลง ความสามารถในการละลายน้ำสูง พองตัวได้ในน้ำเย็น จึงนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ทำให้เส้นใยนั้นมีความสามารถในการกักเก็บที่ดีขึ้น ประสิทธิภาพในการระบายน้ำดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้เครื่องจักรในกระบวนการผลิตสามารถเดินเครื่องได้ดี อีกทั้งแป้งประจุบวกนั้นยังส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษอีกด้วย หรือนำไปใช้เคลือบกระดาษ ทำให้ทนต่อการขูดและรอยถลอก ต้านการซึมของหมึกและของเหลว อีกทั้งทำให้ค่า BOD และ COD ของน้ำทิ้งลดลงด้วย ซึ่งเป็นผลดีต่อสภาพแวดล้อม



ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของแป้งประจุบวก

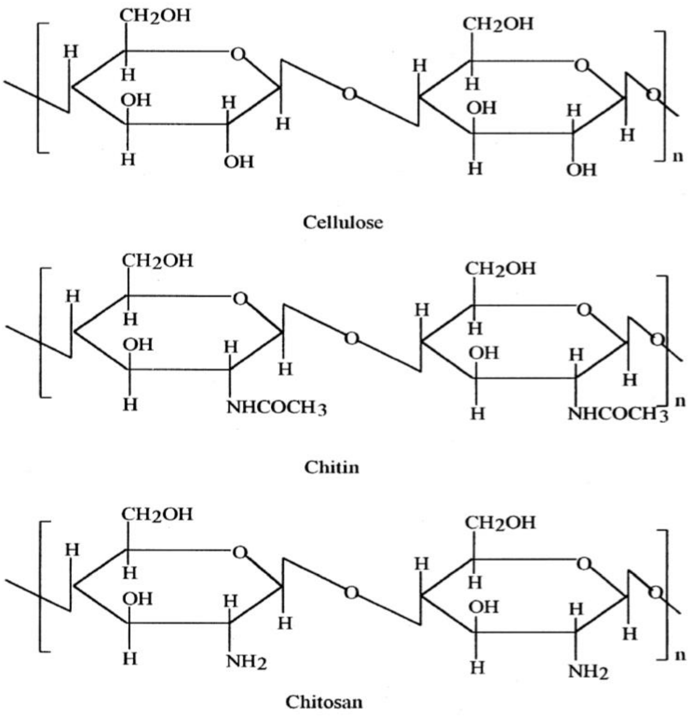
ที่มา: Martin Hubbe [24]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.3 ไคโตซาน

ไคติน (Chitin) และไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ จัดอยู่ในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจนอยู่ในโครงสร้าง สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ สารไคตินและไคโตซานมีลักษณะพิเศษในการนำมาใช้ดูดซับและจับตะกอนต่างๆ ในสารละลาย และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นการหมุนเวียนตามระบบธรรมชาติ [25]

ไคโตซาน เป็นอนุพันธ์ชนิดหนึ่งของไคติน ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่ชื่อว่าดิอะซิทิเลชั่น (Deacetylation) คือ การแยกหมู่อะซิทิลออกจากโมเลกุลของไคติน เหลือเป็นหมู่อะมิโนอิสระ ($-NH_2$) ไคโตซานมีโครงสร้างทางเคมี คือ Poly-β-(1-4)-2-amino-D-glucose ซึ่งโครงสร้างทาเคมีของไคซานก็มีความคล้ายคลึงกับเซลลูโลส ดังแสดงในภาพที่ 2-10

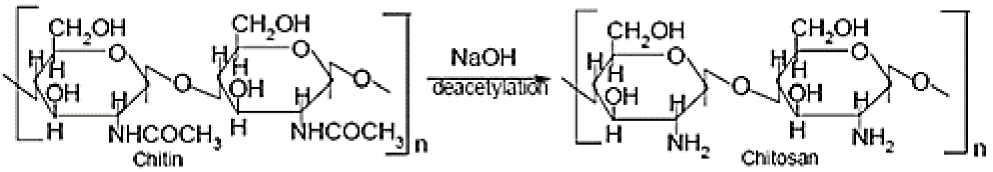


ภาพที่ 2-10 โครงสร้างของเซลลูโลส ไคติน และไคโตซาน

ที่มา: Majeti N.V Ravi Kumar [26]

การเตรียมไคตินและไคโตซาน

กระบวนการสังเคราะห์ไคโตซานนั้นทำโดยการกำจัดหมู่อะซิทิล (deacetylation) ออกจากไคติน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างของไคโตซานที่ได้มาจากปฏิกิริยาดีอะซิทิเลชัน (deacetylation) ของไคติน

ที่มา: http://www.fibre2fashion.com/industry-article/3748/miracle-fibre-chitin [27]

การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน

เนื่องจากไคโตซานเป็นวัสดุที่ได้มาจากธรรมชาติ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่หลากหลาย จึงมีการนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้งานตั้งแต่ในระดับเกษตรกรรมไปจนถึงในทางการแพทย์ดังนี้

1) การบำบัดน้ำ – ใช้ในการกำจัดโลหะหนักและเป็นตัวทำให้เกิดการสร้างตะกอนและตกตะกอน

2) ด้านการแพทย์และเภสัช – ใช้เป็นแผ่นฟิล์มสำหรับรักษาผิวหนังไหม้หรือทำผิวหนังเทียม ใช้ป้องกันเส้นเลือดอุดตัน และควบคุมระดับคลอเรสเตอรอล เป็นต้น

3) อุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ – ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ หรือใช้เคลือบเส้นใยผ้าเพื่อเพิ่มการต้านทานน้ำ

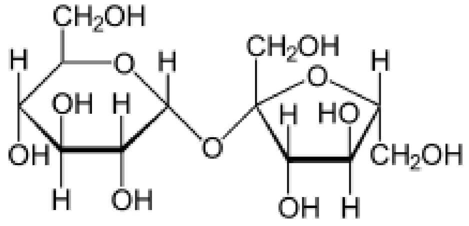
4) อุตสาหกรรมความงาม – นำไปใช้เป็นส่วนผสมในครีม โลชั่น และน้ำยาทาเล็บ

5) การเกษตร – ใช้เป็นสารบำรุงดิน และใช้เคลือบเมล็ดพันธุ์พืช

2.8 กากน้ำตาล

กากน้ำตาล (Molasses) เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกเป็นน้ำตาลได้อีก กากน้ำตาลมีลักษณะข้นเหนียว สีน้ำตาลดำ โดยองค์ประกอบหลักของกากน้ำตาลคือ น้ำ น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส สารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ สารประกอบไนโตรเจน กรดต่างๆ ไข และแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของกากน้ำตาลจากงานวิจัยต่างๆ และภาพที่ 2-12 แสดงโครงสร้างของน้ำตาลซูโครส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2-12 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส

ที่มา: Don A. Carlson [28]

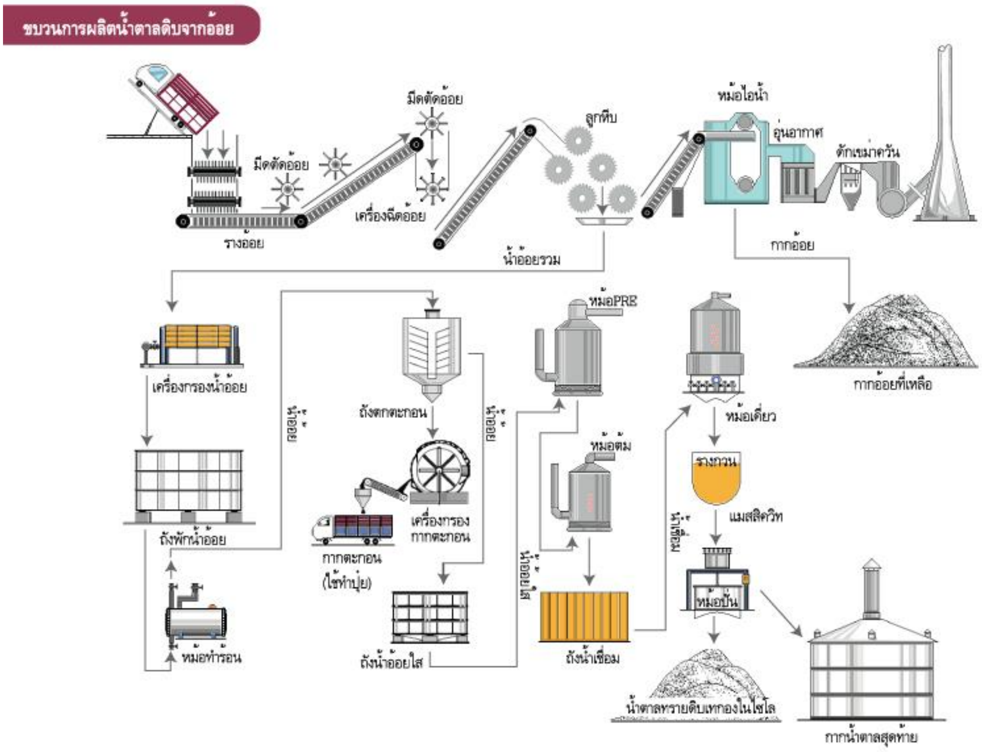
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของกากน้ำตาลในงานวิจัยต่างๆ

	Leo V. [29]	USDA [30]	Takeshi H. และคณะ [31]	C. A. Browne [32]	Hubert O. [33]	กนกวรรณ [34]
น้ำ	---	21.87	18.85	20.0	20.0	20.0
น้ำตาลทั้งหมด	46.0	74.72	48.87	---	62.0	---
ซูโครส	---	29.40	31.76	30.0	32.0	35.0
น้ำตาลอินเวอร์ท	---	---	15.44	30.0	---	---
กลูโคส	---	11.92	---	---	14.0	7.0
ฟรุกโตส	---	12.79	---	---	16.0	9.0
กัมส์	---	---	---	2.0	---	---
โปรตีน	3.0	0.0	---	---	---	---
เถ้า	8.1	3.30	13.82	8.0	8.0	12.0
เยื่อใย	0.0	0.0	---	---	---	---
ไขมัน	0.0	0.10	---	---	---	---
แร่ธาตุต่างๆ	5.38	1.99	---	---	---	---

หมายเหตุ: --- คือ ไม่มีรายงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบแสดงดังภาพที่ 2-13 เริ่มจากการนำอ้อยผ่านเข้าสู่ชุดลูกหีบ (4-5 ชุด) เพื่อทำการสกัดน้ำอ้อย จากนั้นจะนำน้ำอ้อยที่สกัดได้ไปเข้าสู่กระบวนการทำใส เช่น ผ่านเครื่องกรองหรือนำไปทำให้ตกตะกอน เพื่อแยกเอาสิ่งสกปรกต่างๆ ออกจากน้ำอ้อยให้ได้เป็นน้ำอ้อยใส แล้วจึงนำน้ำอ้อยใสนี้ไปเข้าชุดหม้อต้มเพื่อระเหยน้ำออก น้ำอ้อยข้นที่ออกมาจากหม้อต้มชุดสุท้ายนี้จะเรียกว่า น้ำเชื่อม (Syrup) ซึ่งน้ำเชื่อมที่ได้มานี้จะถูกส่งไปเคี่ยวเพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว จะมีการเกิดผลึกน้ำตาลอยู่ในน้ำเชื่อมซึ่งจะเรียกรวมกันว่า แมสควิท (Massecuite) จากนั้นแมสควิทนี้จะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออก จะได้เป็นน้ำตาลทรายดิบและกากน้ำตาล น้ำตาลทรายดิบก็จะถูกนำไปปั่นละลายเพื่อล้างคราบกากน้ำตาลออก จากนั้นจะนำไปทำความสะอาดและฟอกสี แล้วจึงส่งไปเคี่ยวและปั่นแยกผลึกน้ำตาล เพื่อให้ได้เป็นน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ต่อไป



ภาพที่ 2-13 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ
ที่มา: thaisugarmill [35]

โดยทั่วไปกากน้ำตาลจะไม่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลทรายอีก แต่จะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ซึ่งประโยชน์จากกากน้ำตาลมีมาก เช่น ใช้เลี้ยงสัตว์ ใช้ผลิตแอลกอฮอล์ ใช้ทำปุ๋ย ใช้ทำผงชูรส ใช้ทำกรดน้ำส้ม เป็นต้น แม้จะมีการใช้ประโยชน์จากกากน้ำตาลอย่างกว้างขวาง แต่ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ประโยชน์หลักๆ 2 ประการ คือ

1) ใช้เป็นอาหารสัตว์ – กากน้ำตาลมีคุณสมบัติที่เหมาะสำหรับใช้เป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น โค กระบือ เป็นต้น เนื่องจากว่ากากน้ำตาลนั้นช่วยเพิ่มรสชาติอาหารอีกทั้งยังช่วยกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียในกระเพาะของสัตว์ที่ย่อยพวกอาหารหยาบ เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ยอดอ้อย เป็นต้น ส่งผลให้สัตว์จำพวกนี้สามารถใช้ประโยชน์จากอาหารดังกล่าวได้ดีมากยิ่งขึ้น

2) ใช้ผลิตแอลกอฮอล์ – การนำกากน้ำตาลไปผลิตแอลกอฮอล์นั้นทำได้โดยการนำกากน้ำตาลมาทำให้เจือจางด้วยน้ำ จากนั้นทำการหมักโดยใช้ยีสต์พวก *Saccharomyces cerevisiae* เปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ จากนั้นก็นำมากลั่นแยกแอลกอฮอล์ซึ่งจะได้แอลกอฮอล์ที่มีความ

บริสุทธิ์ประมาณ 95% โดยปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้จะแตกต่างกันออกไปตามคุณภาพของกากน้ำตาลที่นำมาผลิต รวมไปถึงกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ของโรงงานนั้นๆ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fahmy T.[1] ศึกษาการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการนำเสนอการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรกครั้งแรกของโลก จากการศึกษาพบว่าค่าความยาวเมื่อขาดและค่าการกักเก็บน้ำของกระดาษมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ใส่กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง การศึกษาก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีของโครงสร้างผนังเซลล์ของเส้นใยกับน้ำตาลซูโครส ส่งผลให้ค่าความยาวตอนขาดและค่าการกักเก็บน้ำมีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในกากน้ำตาลนั้นมีทั้งน้ำตาลซูโครส และกัม (Gums) ซึ่งกัมเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงขณะกระดาษแห้ง ดังนั้นการใส่กากน้ำตาลจึงส่งผลให้กระดาษมีสมบัติที่ดีขึ้นด้วย

Ashori A. และคณะ[2] ได้ศึกษาความสามารถของกากน้ำตาลในการใช้ปรับปรุงสมบัติของกระดาษลูกฟูกเก่าแทนการใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ โดยทดลองใช้ระดับกากน้ำตาลที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (0%, 5%, 10%, 15%, และ 18%) และทดลองใช้ระดับค่าสภาพการระบายน้ำ 3 ระดับ (420, 400, 320 มิลลิลิตร) ผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างกระดาษที่ไม่ได้ใส่กากน้ำตาลแล้ว ตัวอย่างกระดาษที่ใส่กากน้ำตาลมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นความต้านทานแรงฉีก ซึ่งระดับของกากน้ำตาลที่ทำให้สมบัติของกระดาษทั้งความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ค่าความยาวเมื่อขาด (Breaking length) และค่าการต้านทานอากาศเพิ่มสูงสุด คือที่ระดับกากน้ำตาล 18% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งระดับการใช้กากน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นร่วมกับมีการบดเยื่อที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กระดาษ อีกทั้งค่าการกักเก็บน้ำ (Water retention value, WRV) ก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงได้ข้อสรุปว่ากากน้ำตาลสามารถใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษได้

Hamzeh Y. และคณะ[36] ศึกษาการใช้ไคโตซานโมเลกุลต่ำและโมเลกุลสูง การใช้แป้งประจุบวก และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) ในกระดาษลูกฟูก (Old corrugated carton) เพื่อหาปริมาณการใช้ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงสำหรับกระดาษทั้งในขณะแห้งและขณะเปียก ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้ไคโตซานโมเลกุลสูงมีค่ามากกว่ากระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรง ในขณะที่

กระดาษที่ใช้ไคโตซานโมเลกุลต่ำไม่ได้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การใช้พอลิเมอร์ดังกล่าวเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงนั้นสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษได้ทั้งขณะแห้งและขณะเปียก แต่ส่งผลกับความแข็งแรงในขณะแห้งมากกว่า

Ghasemian A. และคณะ[37] ศึกษาผลของการใช้แป้งประจุบวกต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากกระดาษรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกและเยื่อบริสุทธิ์กึ่งเคมี การศึกษานี้จะประเมินจากการใช้เยื่อรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกเป็นตัวเสริมในการผลิต โดยตัวอย่างกระดาษที่ผลิตขึ้นจะได้จากการผสมกันระหว่างเยื่อรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกและเยื่อบริสุทธิ์กึ่งเคมี (0:100, 20:80, 30:70, และ 40:60 โดยน้ำหนัก) และแป้งประจุบวก (ร้อยละ 0, 0.5, 1.2, 2 และ 3 ตามน้ำหนัก) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแป้งประจุบวกนั้นทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น การใช้แป้งประจุบวกร่วมกับการเพิ่มปริมาณเยื่อรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลจากประสิทธิภาพการดูดซับของแป้งที่เยื่อรีไซเคิลมีพื้นที่ผิวมากกว่าเยื่อบริสุทธิ์ ดังนั้นเยื่อรีไซเคิลจึงสามารถดูดซับแป้งไว้ที่พื้นผิวเส้นใยได้มากกว่า

Ashori A. และคณะ[21] ศึกษาผลของไคโตซานต่อสมบัติของกระดาษที่ทำจากเยื่อปอแก้วที่ฟอก ไคโตซานจะเข้าไปรวมกับเส้นใยโดยใช้ 3 เทคนิค ได้แก่ Equilibrium adsorption (pH 5), Precipitation (pH 10), และ Spray application โดยในการทดลองนี้จะใช้ระดับของไคโตซานที่ 0.5%, 1%, 1.5%, และ 2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งพบว่าไคโตซานนั้นไปเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษทั้งแรงฉีก แรงดันทะลุ และแรงดึง แต่ประสิทธิภาพของสมบัติจะดีนั้นก็ขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการทดลองด้วย ซึ่งเทคนิค Spray application นั้นให้สมบัติกระดาษเพิ่มมากที่สุด ตามด้วยเทคนิค Equilibrium adsorption และผลของไคโตซานจะน้อยเมื่อใช้เทคนิค Precipitation ผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มไคโตซานสามารถเพิ่มสมบัติดานความแข็งแรงให้กับกระดาษได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 กระดาษทำผิวกล่อง (Linerboard) เกรด TD-Duo; บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน)

3.1.2 กระดาษทำลอนลูกฟูก (Corrugating Medium) เกรด CS-Superflute; บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน)

3.1.3 กากน้ำตาล (molasses); ยี่ห้อ M Molasses, ประเทศไทย

3.1.4 แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic polyacrylamide, cPAM); บริษัท Kemira (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.5 แป้งประจุบวก (Cationic Starch); บริษัท เนชั่นแนล สตาร์ช แอนด์ เคมิเคิล (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.6 ไคโตซานแบบแผ่น (poly-β-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose: $(C_6H_{12}O_4N)_n$ มีร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิล (%DD) มากกว่าร้อยละ 95; บริษัท เอส.วาย.เค. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด

3.1.7 น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Balance); รุ่น GX- 20K, ประเทศญี่ปุ่น

3.2.2 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Balance); รุ่น TB-4002, บริษัท Denver Instrument ประเทศเยอรมนี

3.2.3 เครื่องวัดความชื้นแบบ IR (Infared Moisture Determination Balance); ยี่ห้อ Kett ประเทศญี่ปุ่น

3.2.4 เครื่องบดเยื่อ (Valley beater); รุ่น UEC-2018A, บริษัท Universal Engineering Corporation, ประเทศอินเดีย

3.2.5 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator); ยี่ห้อ Formax, บริษัท Adirondack Machine Corporation, ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.6 เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness tester); รุ่น LTDA, บริษัท Regmed Industria Technica de Frecisao, ประเทศบราซิล

3.2.7 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven); ยี่ห้อ MMM, รุ่น Venticell, บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH, ประเทศเยอรมนี

3.2.8 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer); รุ่น C-MAG HS 7, บริษัท IKA ประเทศมาเลเซีย

3.2.9 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath); ยี่ห้อ Memmert, ประเทศเยอรมนี

3.2.10 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบรวดเร็วโดยวิธี Rapid Köthen (Rapid Köthen Sheet Machine); ยี่ห้อ PTA, ประเทศออสเตรีย

3.2.11 เครื่องวัดแรงดึงในแนวตั้ง (Vertical Tensile Tester); บริษัท Toyo Seiki Seisaku-cho, ประเทศญี่ปุ่น

3.2.12 เครื่องวัดแรงฉีกขาดของกระดาษ (Elmendorf Tearing Tester); บริษัท Thwing-Albert instrument, ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.13 เครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน (Ring Crush Tester); บริษัท Emerson Apparatus, ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.14 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของกระดาษต่อการโค้งงอ (Taber Stiffness Tester); บริษัท Taber Industries, ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.15 เครื่องวัดค่าความหนาแบบอัตโนมัติ (Digital Micrometer); บริษัท Testing Machine, ประเทศฮอลแลนด์

3.2.16 เครื่องวัดค่าความเรียบของกระดาษ (Smoothness Tester) ; บริษัท Toyo Seiki Seisaku-cho, ประเทศญี่ปุ่น

3.2.17 เครื่องทดสอบการซึมผ่านลมของกระดาษ (Air Permeability); บริษัท Toyo Seiki Seisaku-cho, ประเทศญี่ปุ่น

3.2.18 เครื่องตัดกระดาษแบบใบมีดกด (Ring Crush Test Sample Cutter); บริษัท Hangzhou Pnshar Technology, ประเทศจีน

3.2.19 เครื่องตัดกระดาษแบบกดทับ (สำหรับวัดการต้านแรงฉีก) (Tearing Sample Cutter); บริษัท Universal Engineering Corporation, ประเทศอินเดีย

3.2.20 เครื่องตัดกระดาษแบบกดทับ (สำหรับวัดความคงรูป) (Taber Stiffness Sample Cutter); บริษัท Taber Industries, ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.21 นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch); บริษัท Citizen ประเทศญี่ปุ่น

3.2.22 บีกเกอร์ (Beaker)

3.2.23 กระบอกตวง (Cylinder)

3.2.24 แท่งแก้วคนสาร (Stirring Rod)

3.2.25 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากน้ำตาล

นำกากน้ำตาลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ โดยทำการส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่ ห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Food Research and Testing Laboratory (FRTL))

3.3.2 การเตรียมเยื่อกระดาษ

3.3.2.1 นำกระดาษทำผิวกล่อง (Linerboard) และกระดาษทำลอนลูกฟูก (Corrugating Medium) ไปหาความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบ IR (IR Moisture Determination Balance)

3.3.2.2 จากนั้นนำกระดาษปริมาณ 360 กรัมน้ำหนักแห้ง (กระดาษทำผิวกล่องปริมาณ 180 กรัมน้ำหนักแห้ง และกระดาษทำลอนลูกฟูก 180 กรัมน้ำหนักแห้ง) ไปแช่น้ำปริมาตร 2 ลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2.3 นำกระดาษที่แช่น้ำแล้วไปตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อ (Valley Beater) หลังจากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบดเยื่อ ตามมาตรฐาน TAPPI T200 sp-01 ให้มีค่าสภาพการระบายน้ำ (Freeness) ประมาณ 320-350 มิลลิลิตร ตามมาตรฐาน TAPPI T227 om-04

3.3.3 การเตรียมสารละลาย

3.3.3.1 การเตรียมสารละลายแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

เตรียมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยชั่งน้ำหนักแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ให้ได้น้ำหนักที่ต้องการแล้วนำไปละลายด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ใช้นั้น เป็นไปตามคำแนะนำของบริษัท Kemira (ประเทศไทย) จำกัด

3.3.3.2 การเตรียมสารละลายแป้ง

เตรียมแป้งประจุบวกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งเตรียมโดยชั่งน้ำหนักแป้งประจุบวกให้ได้น้ำหนักตามต้องการ แล้วเติมด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 400 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จดน้ำหนักของสารละลาย แล้วทำการต้มแป้งในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่มีความร้อน 95 องศาเซลเซียส (โดยให้ระดับน้ำมีความสูง 50% ของภาชนะ) จากนั้นจับเวลา 30 นาที โดยทำการกวนแป้งอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีแล้วสารละลายแป้งจะต้องมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 90

องศาเซลเซียส นำออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเมื่อครบ 30 นาทีแล้ว และเติมน้ำร้อน (ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 องศาเซลเซียส) ให้ได้น้ำหนักเท่าน้ำหนักของสารละลายก่อนต้ม ซึ่งปริมาณของแป้งประจุบวกที่ใช้นั้น เป็นไปตามคำแนะนำของบริษัท เนชั่นแนล สตาร์ช แอนด์ เคมิเคิล (ประเทศไทย) จำกัด

3.3.3.3 การเตรียมสารละลายไคโตซาน

เตรียมไคโตซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยชั่งน้ำหนักไคโตซานแล้วนำไปละลายด้วยกรดอะซีติกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนไคโตซาน 1 กรัม ต่อ กรดอะซีติกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณของการใช้ไคโตซานนั้นอ้างอิงจาก Enhancing Dry-Strength Properties of Kenaf (Hibiscus cannabinus) Paper Through Chitosan โดย Alireza Ashori และคณะ [21]

3.3.3.4 การเตรียมสารละลายกากน้ำตาล

เตรียมกากน้ำตาลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยตวงกากน้ำตาลแล้วนำไปละลายด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ จากนั้นนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย เป็นเวลา 30 นาที

3.3.4 การเตรียมน้ำเยื่อ

3.3.4.1 การเตรียมน้ำเยื่อที่มีส่วนผสมของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

นำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาเติมสารละลายแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.3.1 โดยเติมในปริมาณที่ต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 ซึ่งเทียบจากน้ำหนักของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นเติมน้ำลงไปเพื่อเจือจางให้น้ำเยื่อมีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 แล้วนำไปตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator) ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที

3.3.4.2 การเตรียมน้ำเยื่อที่มีส่วนผสมของแป้งประจุบวก

นำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาเติมสารละลายแป้งที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.3.2 โดยเติมสารละลายแป้งในปริมาณที่ต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ซึ่งเทียบจากน้ำหนักของแป้งต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นเติมน้ำลงไปเพื่อเจือจางให้น้ำเยื่อมีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 แล้วนำไปตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที

3.3.4.3 การเตรียมน้ำเยื่อที่มีส่วนผสมของไคโตซาน

นำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาเติมสารละลายไคโตซานที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.3.3 โดยเติมสารละลายไคโตซานในปริมาณที่ต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0.25, 0.50, 0.

75, และ 1.0 ซึ่งเทียบจากน้ำหนักของไคโตซานต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นเติมน้ำลงไปเพื่อเจือจางให้น้ำเยื่อมีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 แล้วนำไปตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที

3.3.4.4 การเตรียมน้ำเยื่อที่มีส่วนผสมของกากน้ำตาล

นำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาเติมสารละลายกากน้ำตาลที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.3.4 โดยเติมสารละลายกากน้ำตาลในปริมาณที่ต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ซึ่งเทียบจากน้ำหนักของกากน้ำตาลต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นเติมน้ำลงไปเพื่อเจือจางเยื่อ ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 แล้วนำไปตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที

3.3.5 การขึ้นแผ่นกระดาษ

นำน้ำเยื่อที่มีส่วนผสมของสารเพิ่มความแข็งแรงต่างๆ ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.4.1, 3.3.4.2, 3.3.4.3, และ 3.3.4.4 มาขึ้นแผ่นกระดาษให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 120 กรัมต่อตารางเมตร ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบรวดเร็วโดยวิธี Rapid Köthen (Rapid Köthen Sheet Machine) ดังแสดงในภาพที่ 3-1 ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 อบแห้งที่ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20±5 นาที

ภาพที่ 3-1 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบรวดเร็วโดยวิธี Rapid Köthen

3.3.6 การทดสอบสมบัติของกระดาษ

นำแผ่นกระดาษที่ได้จากข้อ 3.3.5 ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน TAPPI ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงฉีก ความต้านทานต่อแรงกดในแนววงแหวน ความต้านทานการโค้งงอ ความเรียบ ความต้านอากาศไหลผ่าน

3.3.6.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 เป็นการทดสอบแรงดึงที่มากที่สุดที่สามารถทำให้กระดาษขาดได้ นำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ เพื่อลดปัจจัยด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานในแต่ละแผ่น เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงดึง คือ เครื่องวัดแรงดึงในแนวตั้ง (Vertical Tensile Tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-2

ภาพที่ 3-2 เครื่องวัดแรงดึงในแนวตั้ง

3.3.6.2 ความต้านทานต่อแรงฉีก (Tear Resistance) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-04 เป็นการทดสอบแรงฉีกที่ใช้ในการที่ทำให้กระดาษขาดจากรอยตัดเริ่มต้นในระยะทางหนึ่ง จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear Index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ เพื่อลดปัจจัยด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานในแต่ละแผ่น เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด คือ เครื่องวัดแรงฉีกขาดของกระดาษ (Fully Automated Elmendorf Tear Tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 3-3 เครื่องวัดแรงฉีกขาดของกระดาษ

3.3.6.3 ความต้านแรงกดในแนววงแหวน (Ring Crush Resistance) ตามมาตรฐาน TAPPI T818 เป็นการทดสอบความสามารถของกระดาษที่มีความยาวคงที่ แล้วนำมาโค้งงอให้เป็นวงแหวน จากนั้นให้แรงกดในแนวระนาบเดียวกับกระดาษจนกระดาษหักพับ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) โดยจะใช้เครื่องตัดกระดาษแบบใบมีดกด (Ring Crush Test Sample Cutter) ในการตัดชิ้นทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงกดในแนววงแหวน คือ เครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน (Ring Crush Tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-4

ภาพที่ 3-4 เครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน

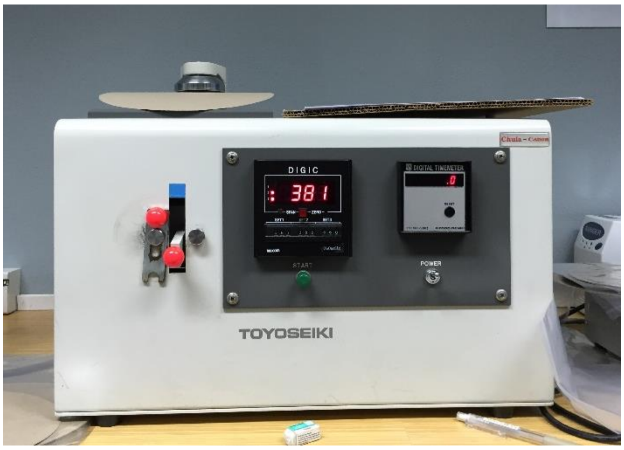
3.3.6.4 ความต้านทานการโค้งงอ (Bending Stiffness) ตามมาตรฐาน TAPPI T489 คือ ความแข็งตัวของกระดาษที่ทนต่อแรงม้วนและโค้งงอจากน้ำหนักของตัวเองหรือจากแรงกระทำจากภายนอก ในการวัดความต้านทานการโค้งงอของกระดาษนั้น จะตัดกระดาษให้โดยเครื่องตัดกระดาษแบบกดทับ จากนั้นหนีบชิ้นทดสอบและให้แรงกับชิ้นทดสอบจนโค้งงอ ทั้งด้านซ้ายและขวา เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คือ เครื่องทดสอบความแข็งแรงของกระดาษต่อการโค้งงอ (Taber Stiffness Tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-5

ภาพที่ 3-5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของกระดาษต่อการโค้งงอ

3.3.6.5 ความพรุน (Porosity) ความพรุนของกระดาษนิยมวัดจากการซึมผ่านลม หรือความต้านทานอากาศของกระดาษ (Air Resistance) นั่นคือ การวัดรูพรุนของกระดาษที่ยอมให้อากาศผ่านด้วยความดันและปริมาณคงที่ โดยที่รูพรุนของกระดาษนั้นขึ้นอยู่กับจำนวน ขนาด และรูปร่างของรูพรุน ซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมของของเหลว เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คือ เครื่องทดสอบการต้านอากาศของกระดาษ (Gurley Air Resistance Tester) มีหน่วยเป็นวินาที (s) ตามมาตรฐาน TAPPI T 460 om-02 ดังแสดงในภาพที่ 3-6

ภาพที่ 3-6 เครื่องทดสอบการซึมผ่านลมของกระดาษ

3.3.6.6 ความเรียบ (Smoothness) ตามมาตรฐาน TAPPI T479 om-99 คือ ความเรียบของผิวกระดาษที่ทดสอบภายใต้ความดัน ประมาณ 100 กิโลนิวตันต่อเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าความเรียบของกระดาษแบบเบคค์ (Bekk Smoothness Tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-7) มีหน่วยเป็นวินาที (s)



ภาพที่ 3-7 เครื่องวัดค่าความเรียบของกระดาษ

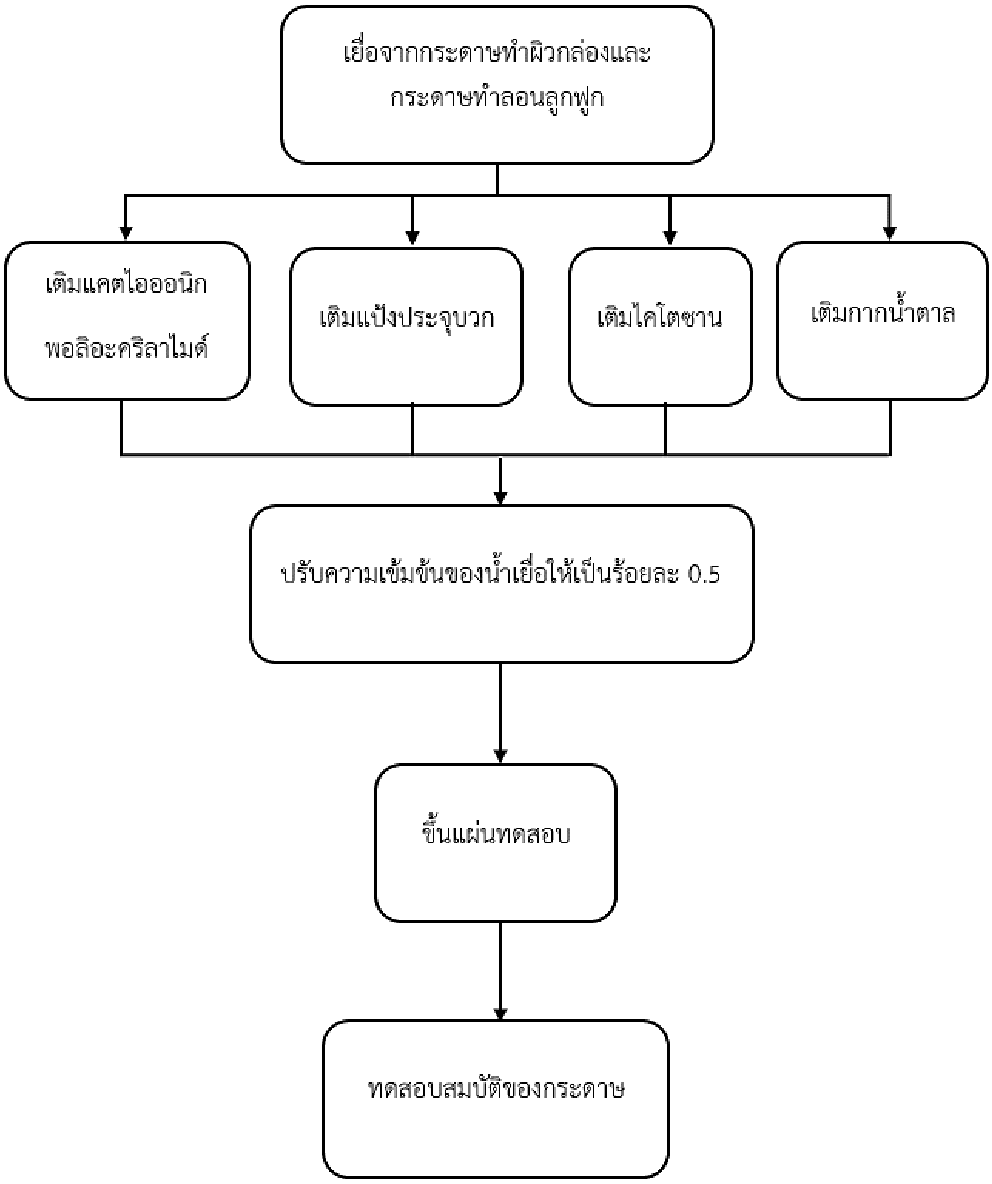
3.3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบสมบัติของกระดาษในข้อ 3.3.5 ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย Analysis of Variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และด้วยวิธี Duncan’s multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขึ้นไป โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics 23 ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.8 การวิเคราะห์ความคุ้มทุนของวัตถุดิบ

นำผลของปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่เหมาะสม ราคาของสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง และค่าความแข็งแรงที่ได้ ไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบความคุ้มทุนของการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิด

แผนผังการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 แผนผังการทดลองการเตรียมน้ำเยื่อ การเตรียมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง การขึ้นแผ่นทดสอบ และการทดสอบสมบัติกระดาษ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากน้ำตาล

จากผลการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบทางอาหาร พบว่ากากน้ำตาลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) ประมาณ 50% โดยส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลซูโครส ซึ่งมีปริมาณถึงประมาณ 35% ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Tamer Y.A. Fahmy [1] พบว่า น้ำตาลซูโครสนั้นทำให้ผนังเซลล์ของเส้นใยเกิดการรวมตัวแนบชิดกันและเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้น ส่งผลให้ค่าความยาวตอนขาดของกระดาษเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Min Zhang และคณะ [38] ที่ได้ใช้กลูโคสและซูโครสในการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ พบว่าซูโครสนั้นทำให้ความแข็งแรงของกระดาษรีไซเคิลเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ใส่น้ำตาลเลย เส้นใยที่ใส่น้ำตาลนั้นจะมีความยืดหยุ่น (Flexibility) และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำที่มากกว่า

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกากน้ำตาล

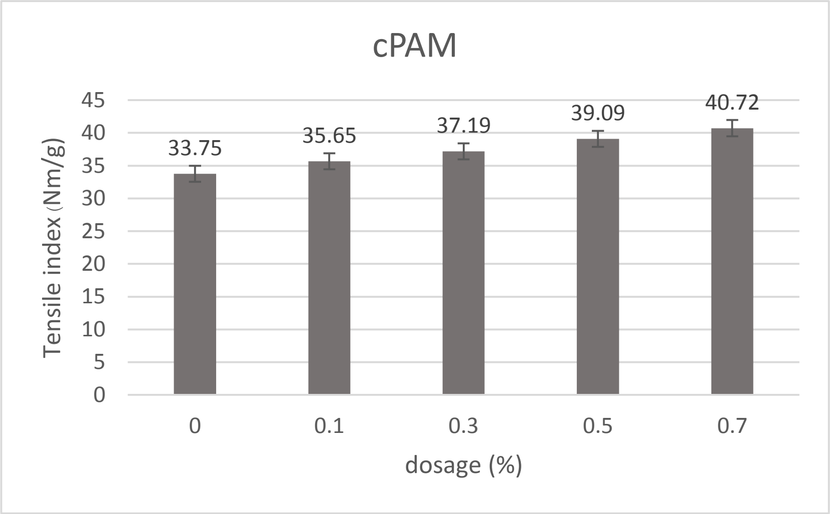
องค์ประกอบ	ปริมาณ (w/w)
น้ำ	18.26
น้ำตาลทั้งหมด	50.56
ซูโครส	34.74
กลูโคส	6.30
ฟรุกโตส	9.52
โปรตีน	4.42
เถ้า	7.40
ไขมัน	---
แร่ธาตุต่างๆ	---

หมายเหตุ: --- คือ ไม่มีรายงาน

4.2 ปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้เลือกใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง 3 ชนิด ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน โดยทำการทดลองใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ 4 ระดับ (ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) แป้งประจุบวก 5 ระดับ (ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) และไคโตซาน 4 ระดับ (ความเข้มข้นร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) โดยระดับของสารเพิ่มความแข็งแรงดังกล่าวนี้อ้างอิงจากการใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งอยู่ในช่วงของความเข้มข้นที่บริษัทแนะนำการใช้ในการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ อย่างไรก็ตาม แม้จะมีผลจากงานวิจัยที่มีการศึกษาการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งและการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งแล้ว แต่จำเป็นที่จะต้องทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิดเพื่อให้ได้ปริมาณของสารเพิ่มความแข็งแรงที่เหมาะสมสำหรับชนิดเยื่อที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

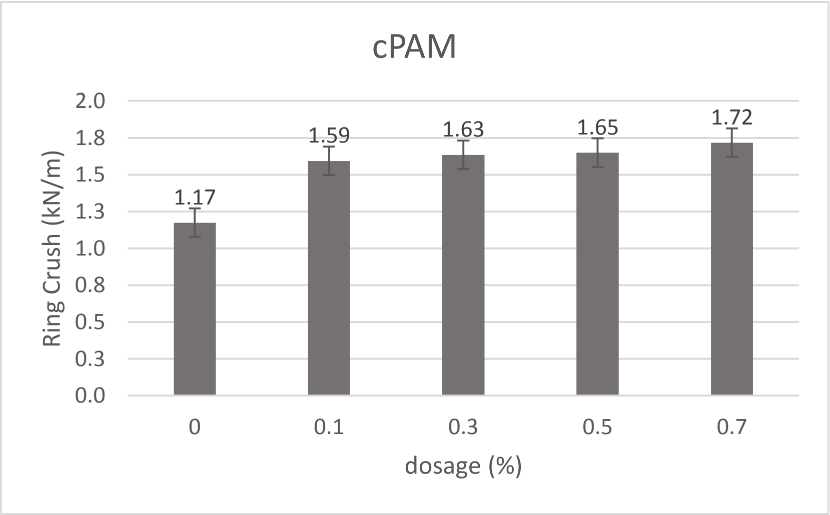
ภาพที่ 4-1 ถึง ภาพที่ 4-3 แสดงสมบัติด้านความแข็งแรง 3 ชนิด ได้แก่ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ที่ปริมาณร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยก่อนหน้าได้ทำการเตรียมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ถึงปริมาณร้อยละ 1.0 แต่ไม่สามารถขึ้นแผ่นทดสอบได้ เนื่องจากในระหว่างการขึ้นแผ่นทดสอบนั้น เยื่อได้ติดกับตะแกรงขึ้นแผ่นและติดกับกระดาษซับ ไม่สามารถแยกออกเป็นแผ่นกระดาษได้ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้น้ำเยื่อมีความข้นเหนียว ซึ่งจากตารางที่ 4.2 ถึง ตารางที่ 4.4 แสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน และดัชนีความต้านทานแรงฉีก ตามลำดับ พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \le 0.05$) ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \le 0.05$) โดยจากผลการทดสอบพบว่าการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 0.7 นั้นให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด (ภาพที่ 4-1) ค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนสูงสุด (ภาพที่ 4-2) และค่าความต้านทานแรงฉีกสูงสุด (ภาพที่ 4-3) โดยเท่ากับ 40.72 Nm/g, 1.72 kN/m และ 6.24 mNm^2/g ตามลำดับ



ภาพที่ 4-1 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

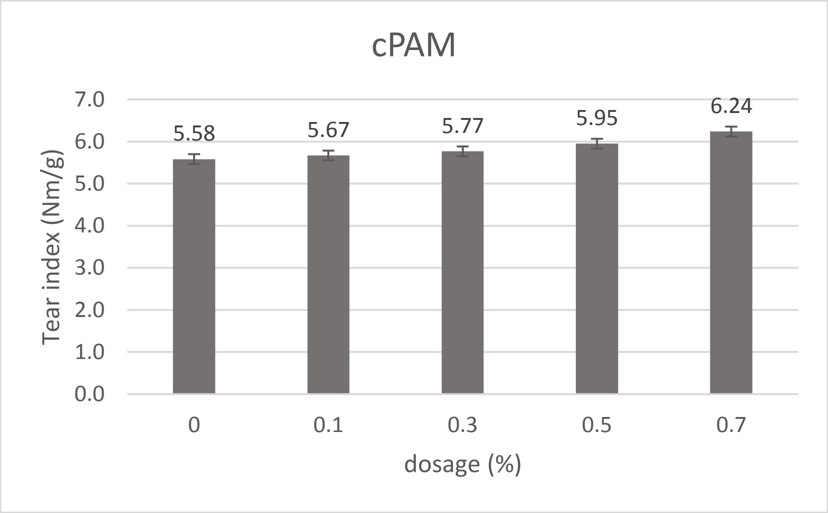
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	181.6033	4	45.40082	16.1622	1.17E-06	2.75871
Within Groups	70.22685	25	2.809074			
Total	251.8301	29				



ภาพที่ 4-2 ความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.563885	4	0.140971	8.352567	0.003145	3.47805
Within Groups	0.168776	10	0.016878			
Total	0.73266	14				



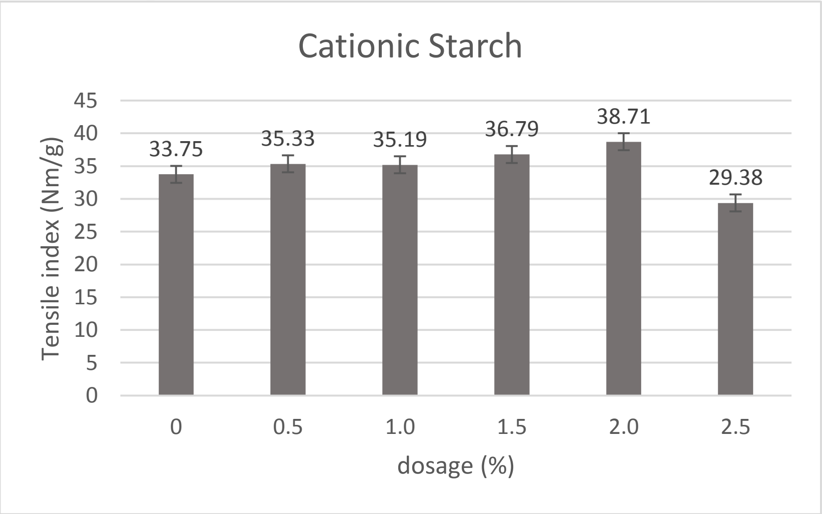
ภาพที่ 4-3 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.812169	4	0.203042	2.436246	0.115547	3.47805
Within Groups	0.833422	10	0.083342			
Total	1.645591	14				

ภาพที่ 4-4 ถึง ภาพที่ 4-6 แสดงสมบัติด้านความแข็งแรง 3 ชนิด ได้แก่ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ที่ปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากผลการทดสอบพบว่าการใช้แป้งประจุบวกที่ปริมาณร้อยละ 2.0 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด (ภาพที่ 4-4) ค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนสูงสุด (ภาพที่ 4-5) และค่าความต้านทานแรงฉีกสูงสุด (ภาพที่ 4-6) โดยเท่ากับ 38.71 Nm/g, 1.66 kN/m และ 5.94 mNm^2/g ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 4.5 ถึง ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน และดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ตามลำดับ พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \le 0.05$) ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \le 0.05$) อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้แป้งประจุบวกในปริมาณร้อยละ 2.5 แล้วส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของกระดาษนั้นน้อยกว่าการใช้แป้งประจุบวกที่ปริมาณร้อยละ 2.0 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากมีการเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย (Flocculation) ในระหว่างการขึ้นแผ่น ส่งผลให้ Formation ของแผ่นทดสอบนั้นไม่ดี ดังแสดงในภาพที่ 4-7 และเมื่อนำแผ่นทดสอบที่ได้มาทดสอบความแข็งแรงจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงน้อยกว่าการใช้แป้งประจุบวกที่ปริมาณร้อยละ 2.0

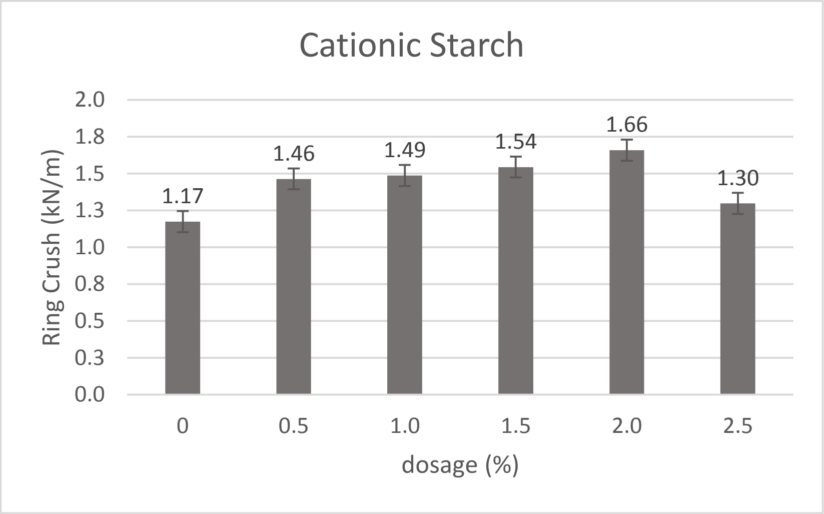
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4-4 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

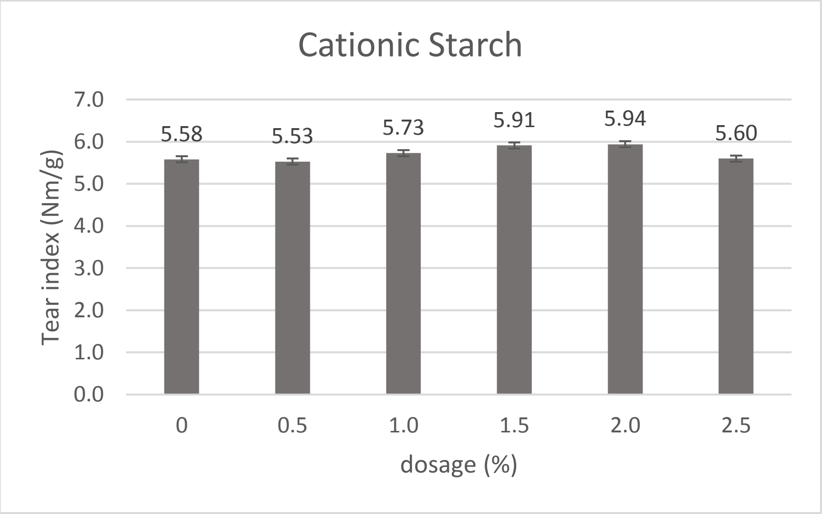
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	300.9675	5	60.1935	25.70485	5.26E-10	2.533555
Within Groups	70.25154	30	2.341718			
Total	371.2191	35				



ภาพที่ 4-5 ความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.456378	5	0.091276	6.006417	0.005216	3.105875
Within Groups	0.182356	12	0.015196			
Total	0.638735	17				

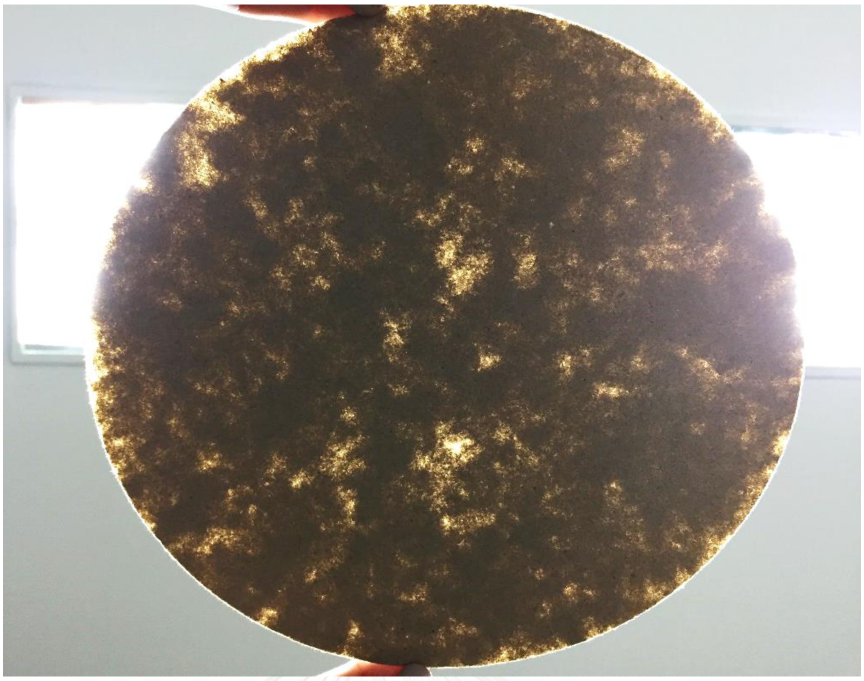


ภาพที่ 4-6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

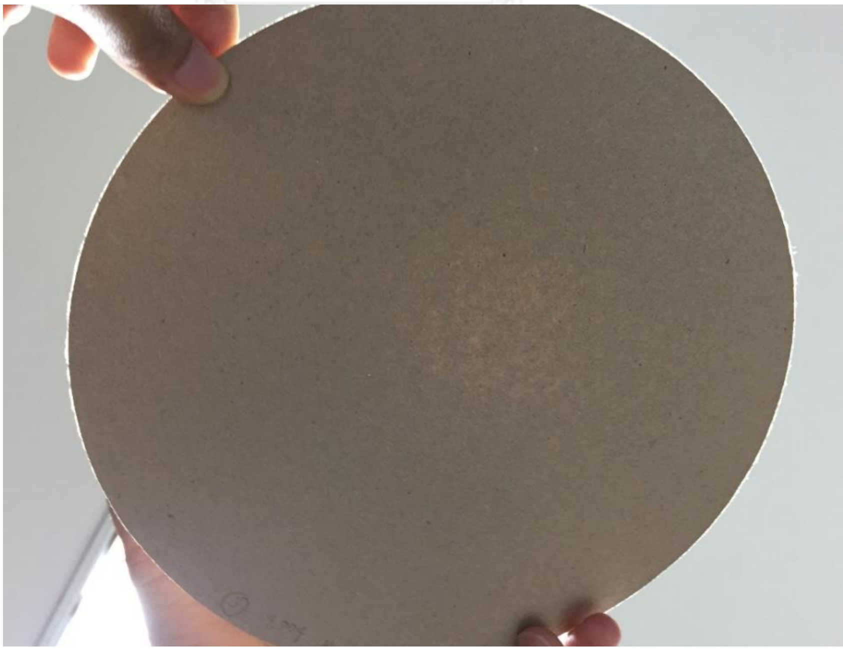
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.469311	5	0.093862	1.76265	0.195164	3.105875
Within Groups	0.639008	12	0.053251			
Total	1.108319	17				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

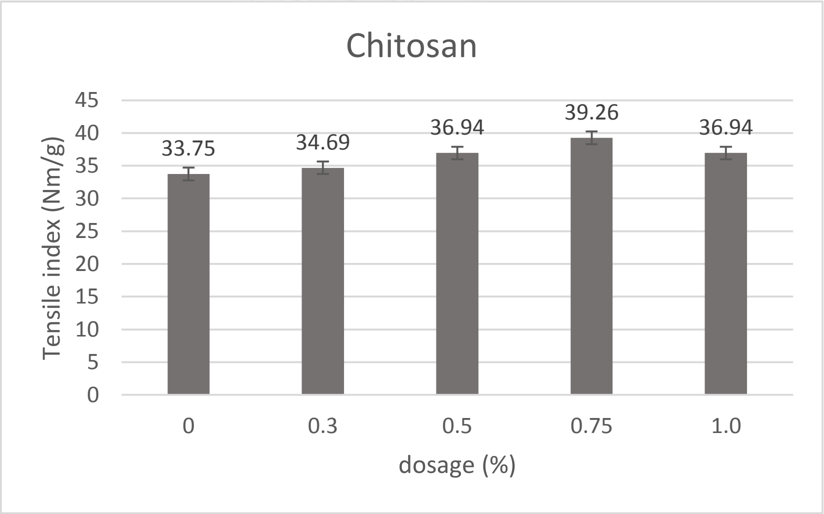


ภาพที่ 4-7 แผ่นทดสอบที่ใช้แป้งประจุบวกร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง



ภาพที่ 4-8 แผ่นทดสอบที่มี Formation ที่ดี

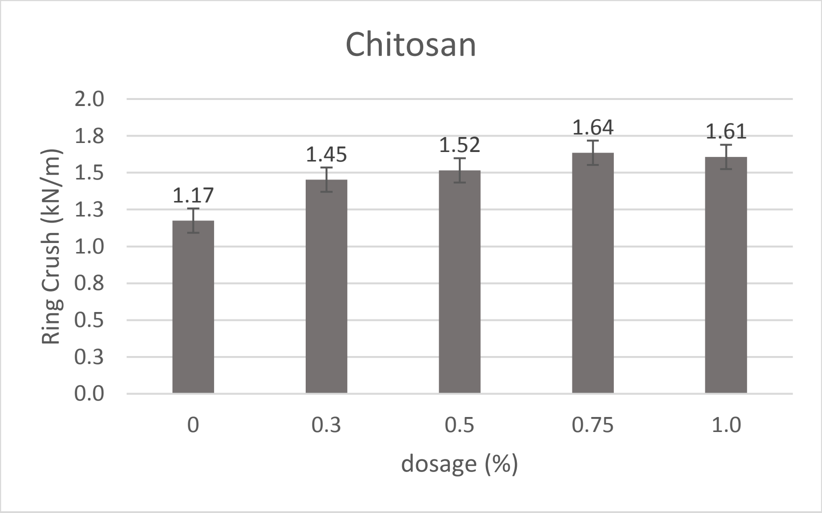
ภาพที่ 4-9 ถึง ภาพที่ 4-11 แสดงสมบัติด้านความแข็งแรง 3 ชนิด ได้แก่ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ที่ปริมาณร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งจากผลการทดสอบนั้นพบว่า การใช้ไคโตซานที่ปริมาณร้อยละ 0.75 นั้นให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด (ภาพที่ 4-8) ค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนสูงสุด (ภาพที่ 4-9) และค่าความต้านทานแรงฉีกสูงสุด (ภาพที่ 4-10) โดยเท่ากับ 39.26 Nm/g, 1.64 kN/m และ 6.11 mNm^2/g ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 4.8 ถึง ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน และดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ตามลำดับ พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value ≤ 0.05) ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value ≤ 0.05)



ภาพที่ 4-9 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

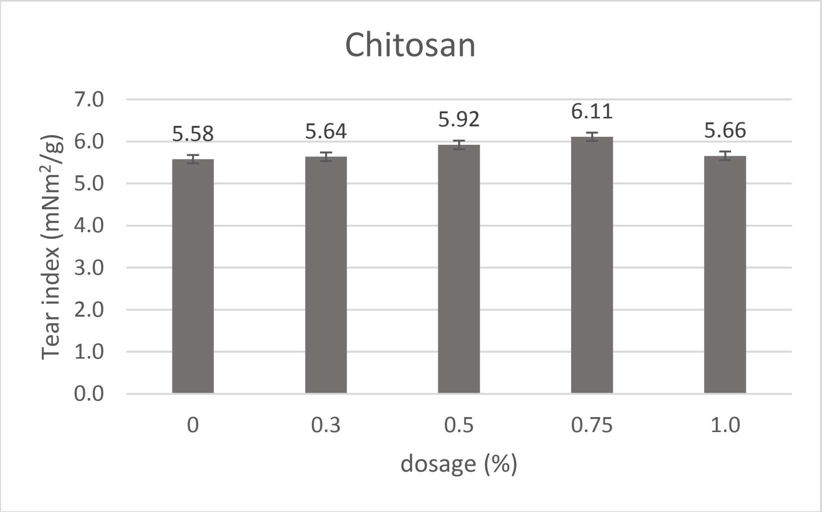
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	112.1794	4	28.04486	10.76289	3.26E-05	2.75871
Within Groups	65.14249	25	2.6057			
Total	177.3219	29				



ภาพที่ 4-10 ความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหนของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.408625	4	0.102156	5.666679	0.012015	3.47805
Within Groups	0.180275	10	0.018028			
Total	0.588901	14				



ภาพที่ 4-11 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้ไคโตซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.614402	4	0.1536	1.400385	0.302394	3.47805
Within Groups	1.096844	10	0.109684			
Total	1.711246	14				

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่ากระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งนั้นมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงที่สุด รองลงมาได้แก่แป้งประจุบวกและไคโตซาน ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์นั้นมีมวลโมเลกุลและระดับกิ่งก้านสาขาที่หลากหลาย ทำให้มีความสามารถในการยึดติดกับพื้นผิวของเส้นใยได้ดี อีกทั้งเอไมด์กรุ๊ป (Amide Group) ในพอลิอะคริลาไมด์ เป็นตัวที่ค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยาในการที่จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้จำนวนพันธะไฮโดรเจนมีเพิ่มมากขึ้น และทำให้การสร้างพันธะไฮโดรเจนของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์นั้นมีประสิทธิภาพมากกว่าการสร้างพันธะไฮโดรเจนของแป้งประจุบวกและไคโตซาน

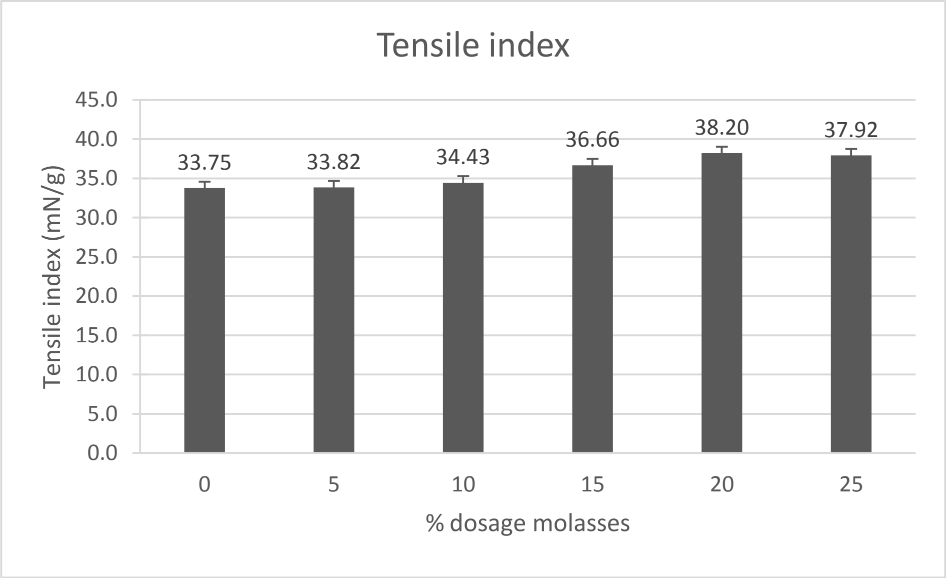
ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงได้เลือกภาวะที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.7, 2.0 และ 0.75 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการใช้กากน้ำตาลในขั้นตอนต่อไป โดยภาวะที่เลือกนั้นเป็นระดับที่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของกระดาษ ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน และความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ มีค่าสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 ปริมาณกากน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า Fahmy T. [1] และ Ashori A. และคณะ [2] ได้ทำการเตรียมกากน้ำตาลเพื่อนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ที่ความเข้มข้นสูงสุดคือที่ร้อยละ 20 และ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมกากน้ำตาลที่ความเข้มข้น 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แล้วนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปทดสอบความแข็งแรงของกระดาษ รวมทั้งสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เพื่อดูความสามารถและความเป็นไปได้ในการใช้กากน้ำตาลแทนการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่น

4.3.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง



ภาพที่ 4-12 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

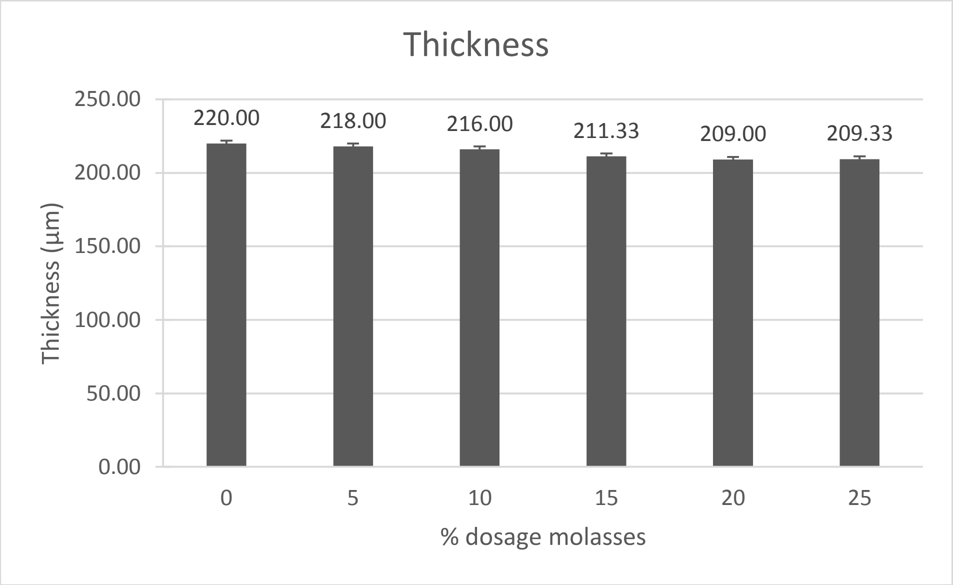
ภาพที่ 4-12 แสดงดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ซึ่งโดยปกติแล้วความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยเป็นสำคัญ ซึ่งกระดาษที่เส้นใยมีการสร้างพันธะระหว่างกันที่ดีก็จะส่งผลให้กระดาษนั้นมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูง จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-12 พบว่า กระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งนั้นมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อมีปริมาณการ

ใช้กากน้ำตาลที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เนื่องมาจากมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) ของน้ำตาลและเส้นใย โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นขณะที่กระดาษเริ่มมีการฟอร์มตัวและเริ่มแห้ง จึงส่งผลให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษอย่างความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้กากน้ำตาล [2] และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากน้ำตาลเป็นร้อยละ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณน้ำตาลที่มากเกินไปในระบบทำให้เกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย ทำให้กระดาษมี Formation ที่ไม่ดี อีกทั้งจากภาพที่ 4-13 แสดงความหนาของกระดาษที่ไม่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลยและกระดาษที่ใช้กากน้ำตาล พบว่าความหนาของกระดาษมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการใช้สารเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เมื่อใส่สารเพิ่มความแข็งแรงเข้าไปแล้วส่งผลให้ความหนาแน่นของกระดาษเพิ่มขึ้น แล้วพันธะระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้น ทำให้กระดาษมีความหนาที่ลดลง

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	125.928	5	25.1856	38.72664	3.3E-12	2.533555
Within Groups	19.51029	30	0.650343			
Total	145.4383	35				

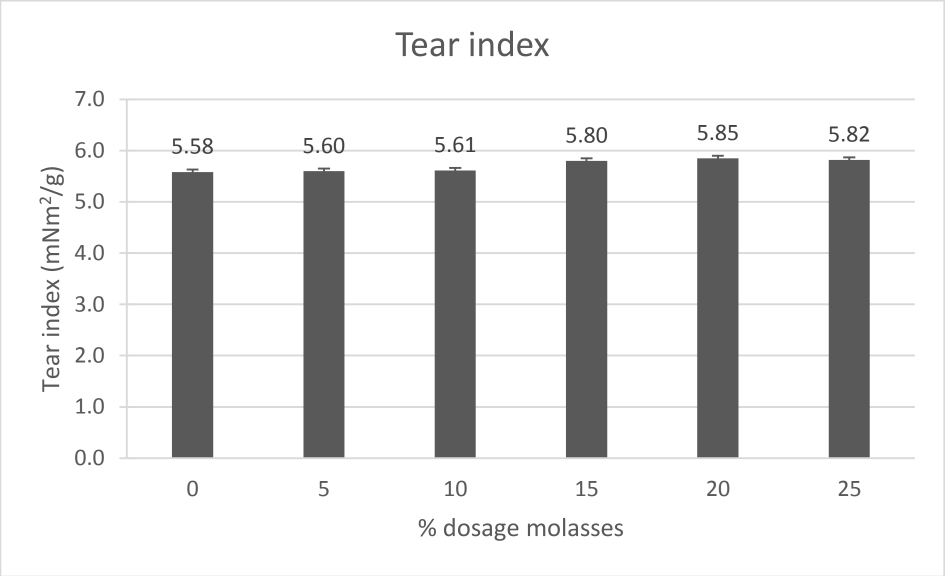
จากตารางที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง พบว่ากระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value ≤ 0.05)



ภาพที่ 4-13 ค่าความหนาของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

4.3.3 ความต้านทานแรงฉีก

ภาพที่ 4-14 แสดงดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่ปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษนั้นเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับตัวเส้นใยมากกว่าพันธะของเส้นใย นั่นคือความแข็งแรงของเส้นใยและความยาวของเส้นใยมีผลมากกว่าพันธะระหว่างเส้นใย ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งนั้นไม่ได้ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมากนัก ดังแสดงใน ภาพที่ 4-14 และตารางที่ 4.12 พบว่ากระดาษมีดัชนีความต้านทานแรงฉีกที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \leq 0.05$) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงแล้ว ดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง โดยค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษสูงสุด คือ ที่การใช้กากน้ำตาลในปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เป็นผลมาจากมีการสร้างพันธะที่เพิ่มขึ้นระหว่างเส้นใย จึงช่วยเสริมให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยด้วย

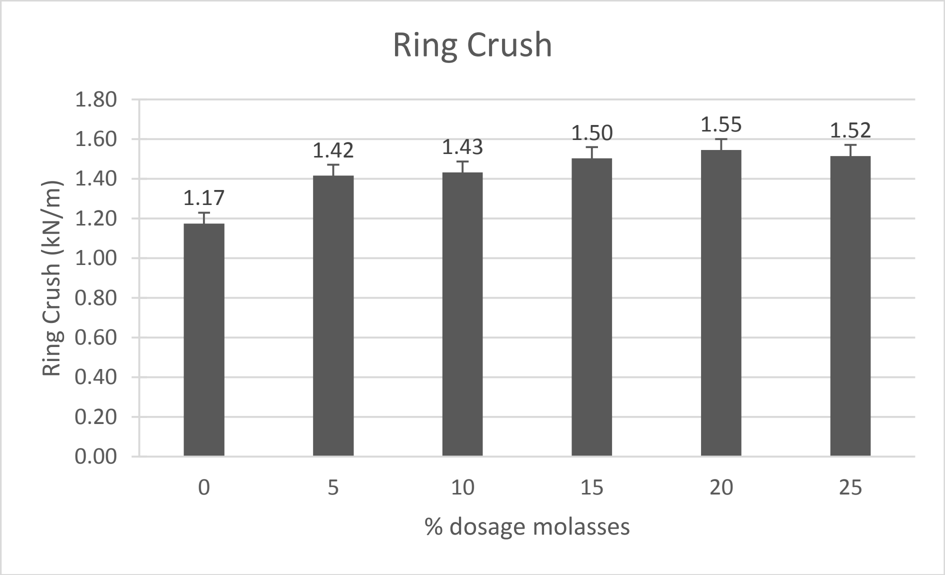


ภาพที่ 4-14 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.235413	5	0.047083	46.87225	1.84E-07	3.105875
Within Groups	0.012054	12	0.001004			
Total	0.247467	17				

4.3.4 ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน



ภาพที่ 4-15 ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

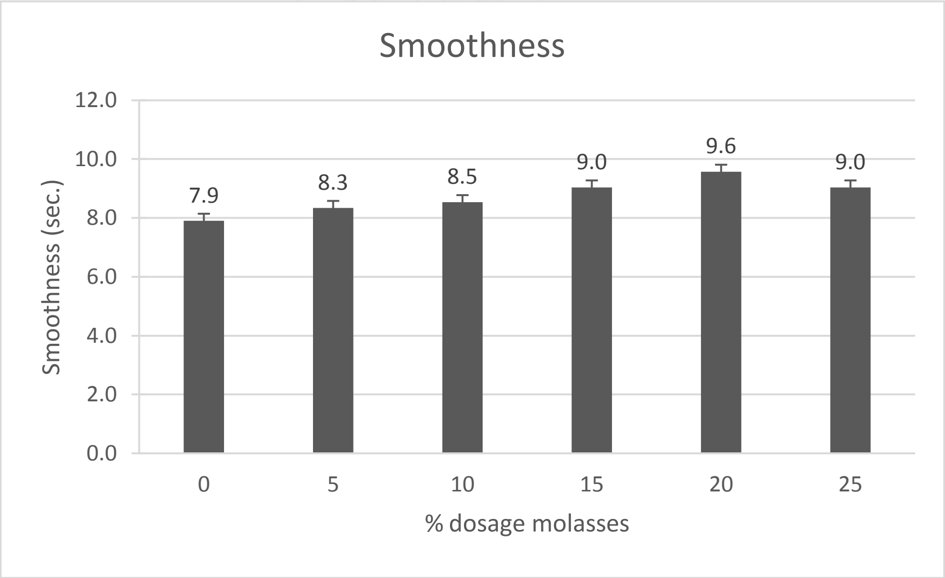
จากภาพที่ 4-15 แสดงค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง โดยทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนในกระดาษที่มีการใช้กากน้ำตาลและกระดาษที่ไม่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งใดเลย พบว่า การใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงนั้นส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมากกว่ากระดาษที่ไม่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งปริมาณของการใช้กากน้ำตาลที่ส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมากที่สุด คือ การใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 20 รองลงมาคือการใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 15 การใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 10 และการใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 5 ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value ≤ 0.05) พบว่าค่าความต่านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษนั้นมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่เพิ่มขึ้นนี้ สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษเช่นเดียวกัน โดยผลของความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกับเส้นใย อีกทั้งอาจเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของซูโครสนั้นได้ซึมเข้าไปตามรูพรุนไมโครพอร์หรือนาโนพอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.8 นาโน

เมตร [2, 39] จึงทำให้พันธะระหว่างเส้นใยนั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของกระดาษอย่างความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมีค่าที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.275474	5	0.055095	3.810607	0.026756	3.105875
Within Groups	0.173499	12	0.014458			
Total	0.448974	17				

4.3.1 ความเรียบ



ภาพที่ 4-16 ค่าความความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

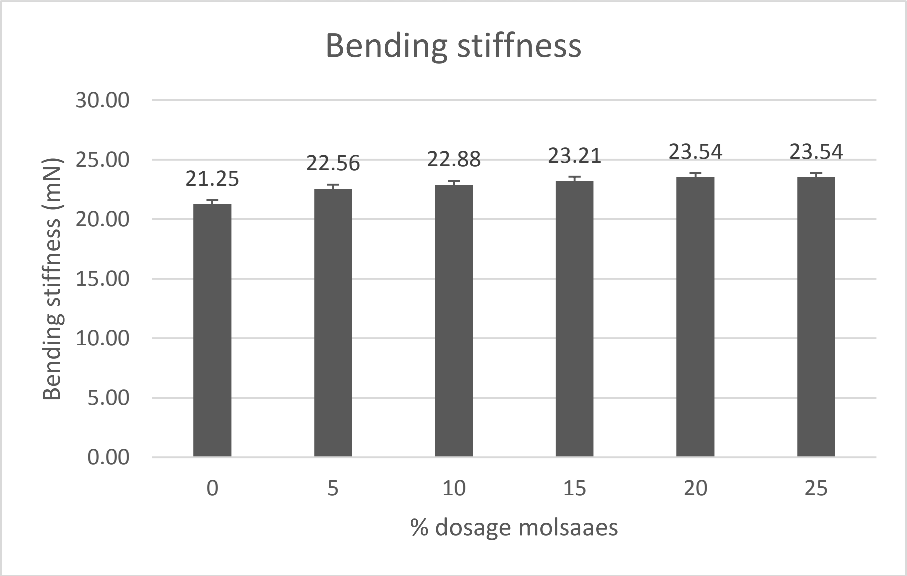
ในการทดลองนี้ทำการวัดความเรียบของกระดาษด้วยวิธีเบคค์ โดยทำการจับเวลาที่อากาศปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใช้ในการไหลผ่านผิวกระดาษตามมาตรฐาน TAPPI T479 cm-09 จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-16 และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง (ตารางที่ 4.14) พบว่าค่าความเรียบของกระดาษมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \leq 0.05$) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งใดเลย (Blank) กับกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสาร

เพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งนั้น การใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 5 และ10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ส่งผลให้กระดาษมีความเรียบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยปริมาณร้อยละของกากน้ำตาลที่ส่งผลให้กระดาษมีค่าความเรียบสูงสุด คือ ที่ปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของกากน้ำตาลที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยมาก ดังนั้นเมื่อมีการเติมกากน้ำตาลแล้วอนุภาคของกากน้ำตาลจึงเข้าไปอยู่ตามช่องว่างระหว่างเส้นใย ส่งผลให้กระดาษที่ใช้กากน้ำตาลนั้นมีความเรียบมากกว่ากระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลย อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของกากน้ำตาลเป็นร้อยละ 25 แล้วพบว่าค่าความเรียบของกระดาษมีค่าที่ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากเส้นใยมีการสร้างพันธะระหว่างกันมากขึ้น จนเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน จึงส่งผลให้ความเรียบของกระดาษลดลง

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	5.306667	5	1.061333	2.244888	0.116588	3.105875
Within Groups	5.673333	12	0.472778			
Total	10.98	17				

4.3.5 ความต้านทานการโค้งงอ

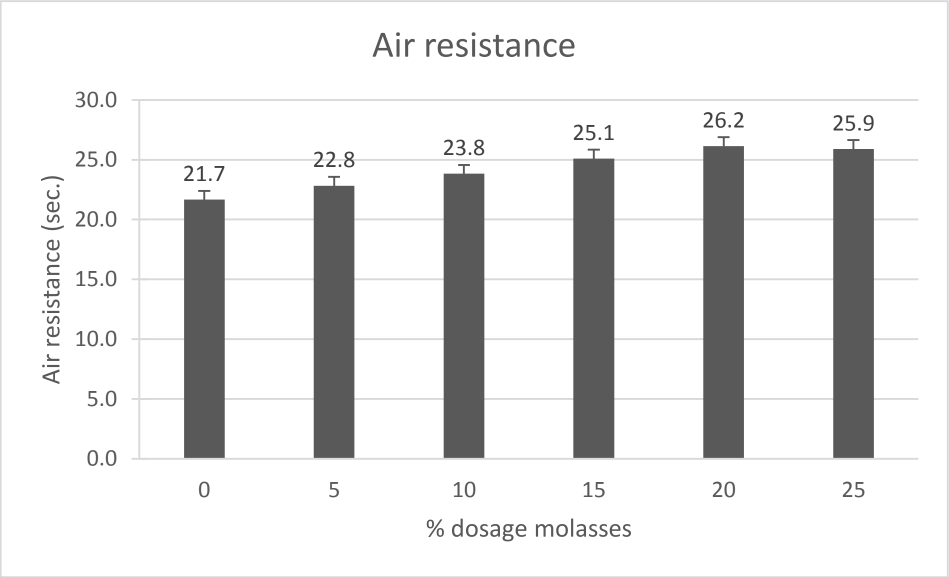


ภาพที่ 4-17 ความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

โดยปกติแล้ว ความต้านทานการโค้งงอของกระดาษนั้นขึ้นกับความหนาและมอดุลัสความยืดหยุ่นของกระดาษเป็นสำคัญ จากภาพที่ 4-17 แสดงค่าความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ไม่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลย เปรียบเทียบกับกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่ปริมาณต่างๆ คือ ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่า ค่าความต้านทานการโค้งงอของกระดาษนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่กากน้ำตาล ทั้งนี้โดยปกติแล้ว กระดาษที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระดาษมีความต้านทานการโค้งงอเพิ่มขึ้นไปด้วย แต่จากภาพที่ 4.13 ซึ่งแสดงความหนาของกระดาษ จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่กากน้ำตาลลงไปในกระดาษ จะทำให้ความหนาของแผ่นลดลง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานการโค้งงอจึงไม่น่าจะเกิดจากความหนาที่เปลี่ยนไป แต่น่าจะเกิดจากมอดุลัสความยืดหยุ่นของกระดาษที่เปลี่ยนไป เนื่องจากโมเลกุลของน้ำตาลเข้าไปช่วยเสริมแรงในแผ่นกระดาษ

4.3.6 ความต้านทานอากาศ

ในการวัดค่าความต้านทานอากาศของกระดาษนั้นเป็นการวัดการผ่านของอากาศภายในโครงสร้างของกระดาษ ซึ่งนั่นหมายถึงรูพรุนของตัวกระดาษเอง โดยในการวัดนั้นจะทำการวัดจากเวลาที่ใช้ในการผ่านของอากาศภายใต้สภาวะที่เฉพาะ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-18 และตารางที่ 4.15 จากผลการทดลอง พบว่า การใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษนั้นสามารถเพิ่มค่าความต้านทานอากาศของกระดาษได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value $\leq$ 0.05) โดยปริมาณของกากน้ำตาลที่สามารถเพิ่มค่าความต้านทานอากาศได้มากที่สุดคือการใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง นั่นเป็นผลมาจากโมเลกุลของน้ำตาลที่เข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย อีกทั้งพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลและเส้นใย จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยลดน้อยลง และทำให้กระดาษนั้นมีค่าความต้านทานอากาศเพิ่มขึ้น เมื่อกระดาษมีค่าความต้านทานอากาศที่เพิ่มขึ้นนั่นคือกระดาษความพรุนน้อยลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงและการต้านทานแรงกดในแนววงแหวนที่มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

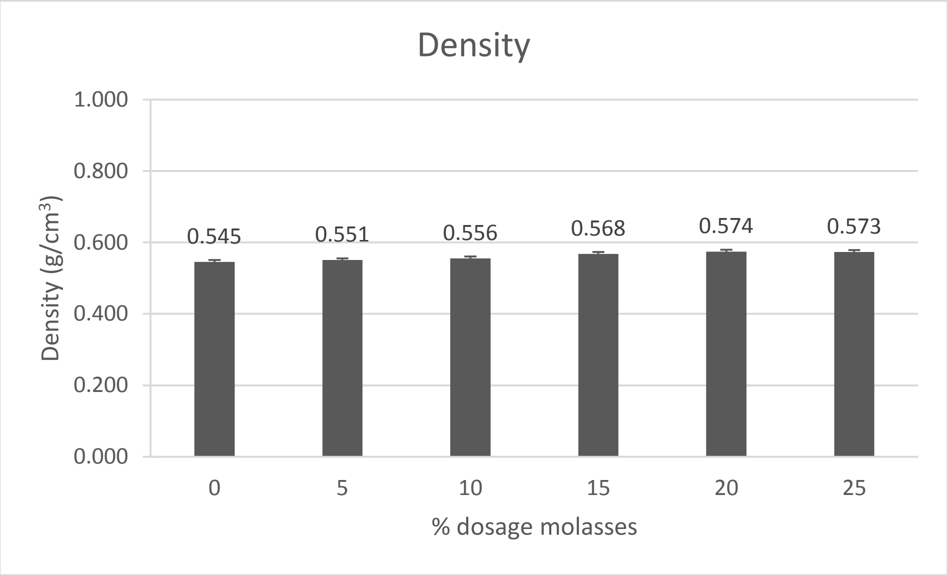


ภาพที่ 4-18 ความต้านทานอากาศของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานอากาศไหลผ่านของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	47.88409	5	9.576819	21.80818	1.22E-05	3.105875
Within Groups	5.269667	12	0.439139			
Total	53.15376	17				

จากตารางที่ 4.16 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นของกระดาษ พบว่ากระดาษมีความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value ≤ 0.05) ซึ่งความหนาแน่นของกระดาษนั้นสัมพันธ์กับการสร้างพันธะหรือการแนบตัวกันได้ดีของเส้นใย กระดาษที่มีความหนาแน่นสูง เส้นใยมักจะแนบตัวกันได้ดี ทำให้พันธะระหว่างเส้นใยดี ความแข็งแรงของกระดาษก็จะเพิ่มมากขึ้น และรูพรุนภายในกระดาษก็จะลดลงเช่นกัน ซึ่งหมายความว่าค่าความต้านอากาศก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4-19 ความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

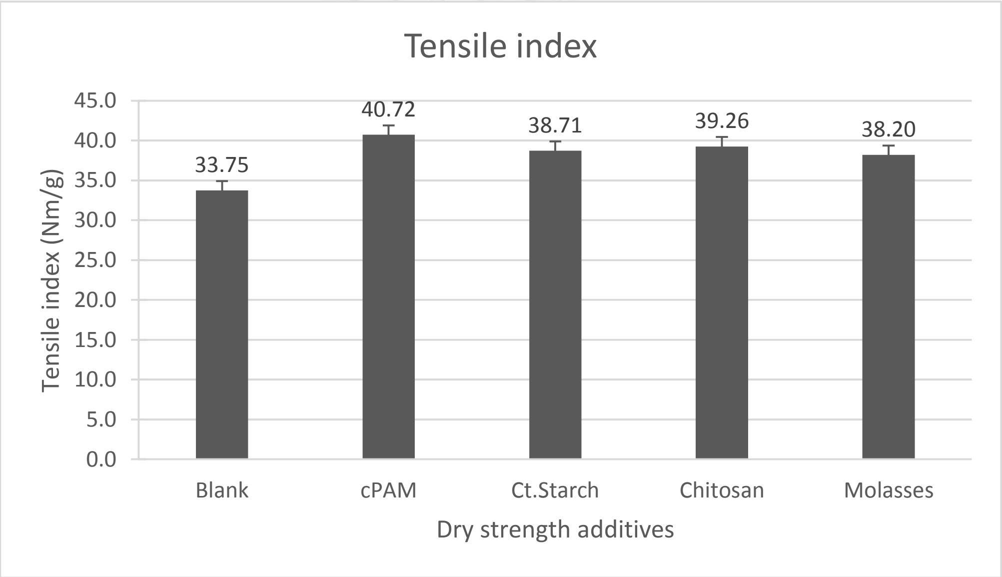
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.002256	5	0.000451	8.775046	0.001061	3.105875
Within Groups	0.000617	12	5.14E-05			
Total	0.002874	17				

จากการทดลองหาปริมาณกากน้ำตาลที่เหมาะสม พบว่า กระดาษที่ใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง นั้นให้สมบัติด้านความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงไม่ควรเลือกใช้ในการวิเคราะห์ขั้นต่อไป ส่วนปริมาณของกากน้ำตาลที่ให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษสูงสุด คือ การใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tamer Y.A. Fahmy [1] ที่ได้ทำการใช้กากน้ำตาลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้งแล้วทำให้ค่าความยาวตอนขาดของกระดาษสูงสุด โดยหลังจากได้ความเข้มข้นในการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงสูงสุดแล้วจะนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป เพื่อเปรียบเทียบถึงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่นๆ

4.4 เปรียบเทียบผลของปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งและกากน้ำตาลที่เหมาะสม

ในการเปรียบเทียบผลของการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงและการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่นๆนั้น จะนำผลของการใช้กากน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากข้อ 4.3 ซึ่งเป็นปริมาณที่ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงสุด มาเปรียบเทียบผลจากการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงทั้ง 3 ชนิด จากข้อ 4.2 ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 0.7 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แป้งประจุบวกที่ปริมาณร้อยละ 2.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และไคโทซานที่ปริมาณร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อดูความสามารถและความเป็นไปได้ในการใช้กากน้ำตาลแทนการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงเหล่านี้ ซึ่งระดับต่างๆ ข้างต้นนี้ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงสุดเช่นเดียวกัน

4.4.2 ความแข็งแรงต่อแรงดึง



ภาพที่ 4-20 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น

จากการศึกษาผลของความแข็งแรงต่อแรงดึงในกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด ดังแสดงผลในภาพที่ 4-20 และตารางที่ 4-17 พบว่าในการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA ความแข็งแรงต่อแรงดึงในกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้งนั้นให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษน้อยกว่ากระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธี Duncan (ดังแสดงในตารางที่ 4.18) พบว่า

การใช้กากน้ำตาลนั้นให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการใช้แป้งประจุบวกและไคโตซาน แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	82.57356	4	20.64339	16.67529	0.000201	3.47805
Within Groups	12.37963	10	1.237963			
Total	94.95319	14				

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Dry Strength Additives	Dry Strength Properties ± S.D.					
	Smoothness (sec.)	Tensile (Nm/g)	Tear (mNm^2/g)	Ring Crush (kN/m)	Bending Stiffness (mN)	Air Resistance (sec.)
blank	7.9 ± 1.08^c	33.75 ± 0.55^c	5.58 ± 0.06^b	1.17 ± 0.29^b	21.25 ± 1.50^b	21.67 ± 1.14^c
cPAM	11.2 ± 0.47^a	40.72 ± 2.14^a	6.24 ± 0.33^a	1.72 ± 0.02^a	24.52 ± 0.98^a	29.24 ± 0.45^a
CtStarch	10.4 ± 0.35^{ab}	38.71 ± 0.98^b	5.94 ± 0.20^{ab}	1.66 ± 0.04^a	23.86 ± 0.57^a	26.44 ± 0.55^b
Chitosan	10.1 ± 0.58^{ab}	39.26 ± 1.12^b	6.11 ± 0.40^a	1.64 ± 0.03^a	23.86 ± 0.57^a	27.45 ± 0.67^b
Molasses	9.6 ± 0.45^b	38.20 ± 0.53^b	5.85 ± 0.01^{ab}	1.55 ± 0.02^a	23.54 ± 0.98^a	26.15 ± 0.28^b

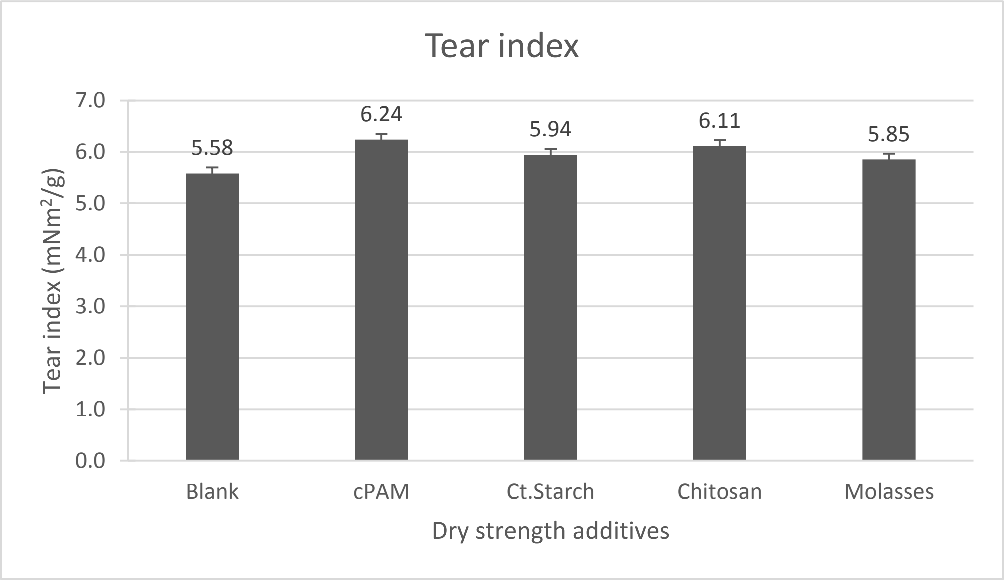
Chulalongkorn University

หมายเหตุ: a, b, c เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value≤0.05)

4.4.3 ความต้านทานแรงฉีก

ผลการเปรียบเทียบดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ร้อยละ 0.7 แป้งประจุบวกร้อยละ 2.0 และไคโตซานร้อยละ 0.75 แสดงดังภาพที่ 4-21 และตารางที่ 4-19 และ พบว่า การใช้กากน้ำตาลที่ร้อยละ 20 นั้นให้ดัชนีความต้านทานแรงฉีกที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธี Duncan (ดังแสดงในตารางที่ 4.18) พบว่า การใช้กากน้ำตาลนั้นให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวกและไคโตซานเช่นเดียวกัน เนื่องจากค่าความต้านทานแรงฉีกเป็นค่าที่ขึ้นกับความแข็งแรงและความยาวของเส้นใยมากกว่าพันธะ

ระหว่างเส้นใย ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้เยื่อชนิดเดียวกัน บดเยื่อที่ระยะเวลาเท่ากันและบดให้มีค่าการระบายน้ำอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังนั้นความยาวและความแข็งแรงของเส้นใยจึงไม่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและกระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดต่างๆ นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



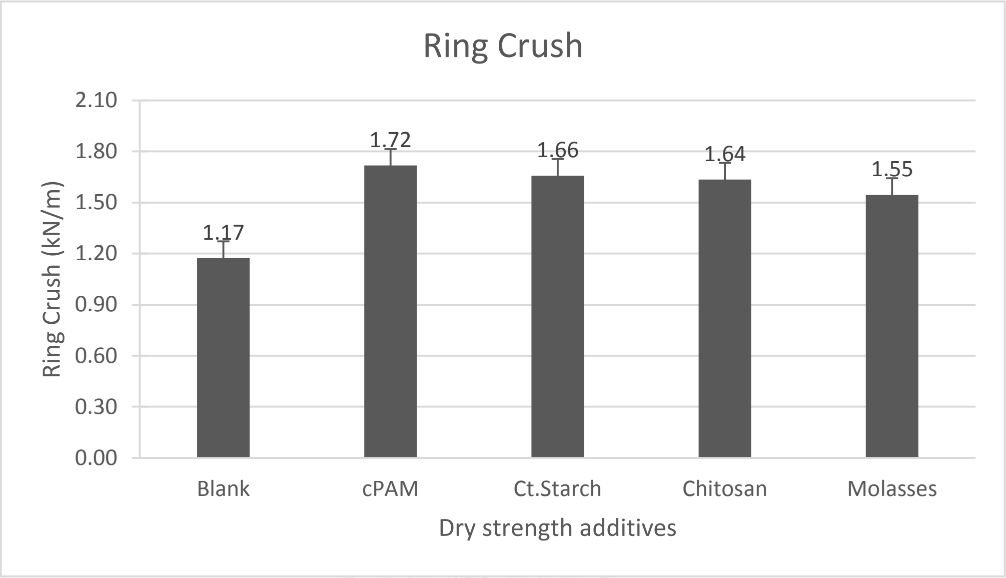
ภาพที่ 4-21 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.764576	4	0.191144	3.105746	0.066511	3.47805
Within Groups	0.615453	10	0.061545			
Total	1.380028	14				

4.4.4 ความต้านทานแรงกดแนววงแหวน



ภาพที่ 4-22 ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาล และสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น

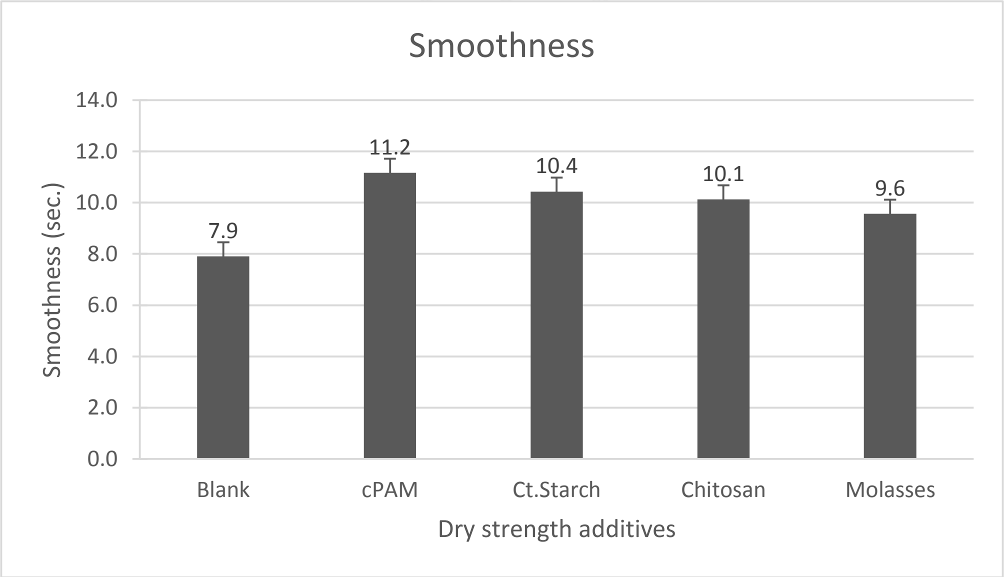
จากภาพที่ 4-22 แสดงค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง 3 ชนิด คือ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA ดังตารางที่ 4-20 แล้ว ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงนั้นมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับกระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงทั้ง 3 ชนิด ($p \leq 0.05$) โดยจะเห็นได้ว่า การใช้กากน้ำตาลนั้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ไม่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดๆเลย แต่การใช้กากน้ำตาลนั้นยังให้ค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนต่ำกว่าสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่นๆ แต่เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Duncan (ดังแสดงในตารางที่ 4.18) พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับกระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลย โดยจากการทดลองพบว่า แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ให้ค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนสูงสุด รองลงมาคือ แป้งประจุบวก และไคโตซาน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.564849	4	0.141212	8.372424	0.003118	3.47805
Within Groups	0.168663	10	0.016866			
Total	0.733512	14				

4.4.1 ความเรียบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน โดยนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ one-way ANOVA ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ ANOVA พบว่า ผลที่ได้จากการใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่นๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) โดยค่าความเรียบของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์นั้นมีค่าสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4-21 และเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Duncan (ดังแสดงในตารางที่ 4.18) พบว่าค่าความเรียบของกระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงนั้นแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับกระดาษที่ไม่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลย ผลดังแสดงในภาพที่ 4-23

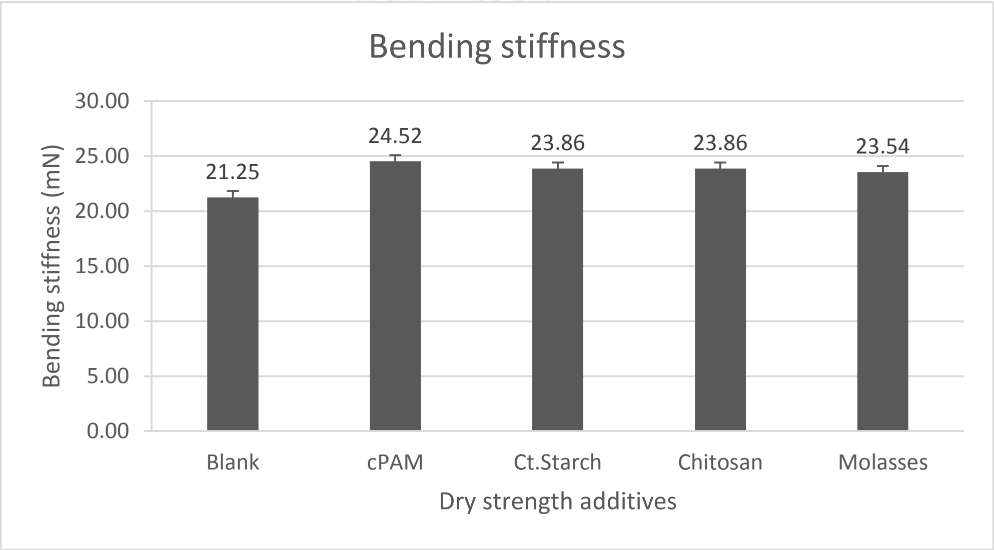


ภาพที่ 4-23 ความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความเรียบของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	18.10933	4	4.527333	11.02435	0.001096	3.47805
Within Groups	4.106667	10	0.410667			
Total	22.216	14				

4.4.5 ความต้านทานการโค้งงอ



ภาพที่ 4-24 ความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น

จากการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA ($p \leq 0.05$) เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลร้อยละ 20 กับสารเพิ่มความแข็งแรง ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ร้อยละ 0.7 แป้งประจุบวกร้อยละ 2.0 และไคโตซานร้อยละ 0.7 ดังแสดงในภาพที่ 4-24 และตารางที่ 4-22 โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดต่างๆกับกระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลยนั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (แสดงดังตารางที่ 4-21) และเมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Duncan (ดังแสดงในตารางที่ 4.18) พบว่า กระดาษที่

ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิดนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์นั้นให้ค่าความต้านทานการโค้งงอ ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ โดยที่พันธะไฮโดรเจนทำให้มอดุลัสความยืดหยุ่นของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความต้านทานการโค้งงอของกระดาษเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานการโค้งงอของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	18.97743	4	4.744357	4.933333	0.018582	3.47805
Within Groups	9.61694	10	0.961694			
Total	28.59437	14				

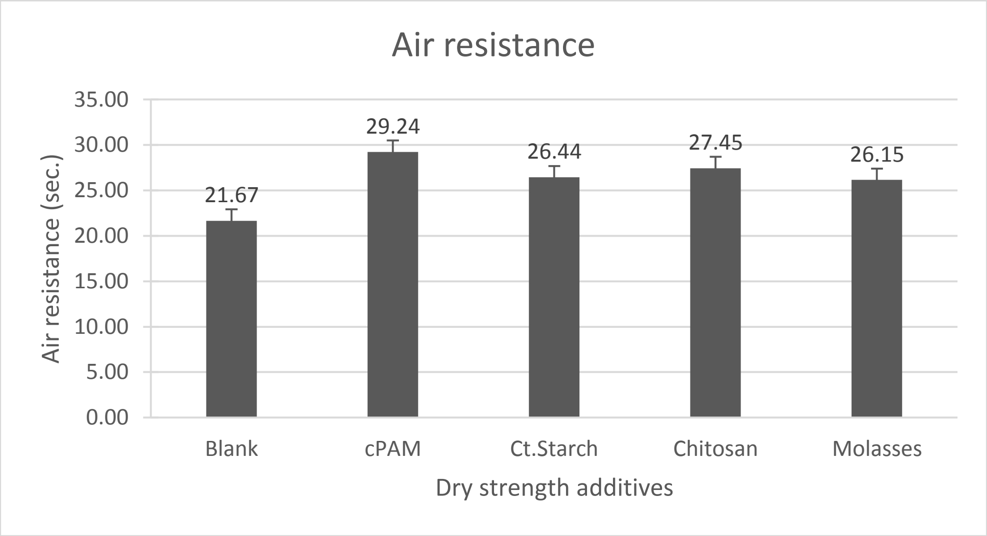
4.4.6 ความต้านทานอากาศ

ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านอากาศไหลผ่านของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด และกระดาษที่ไม่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรง

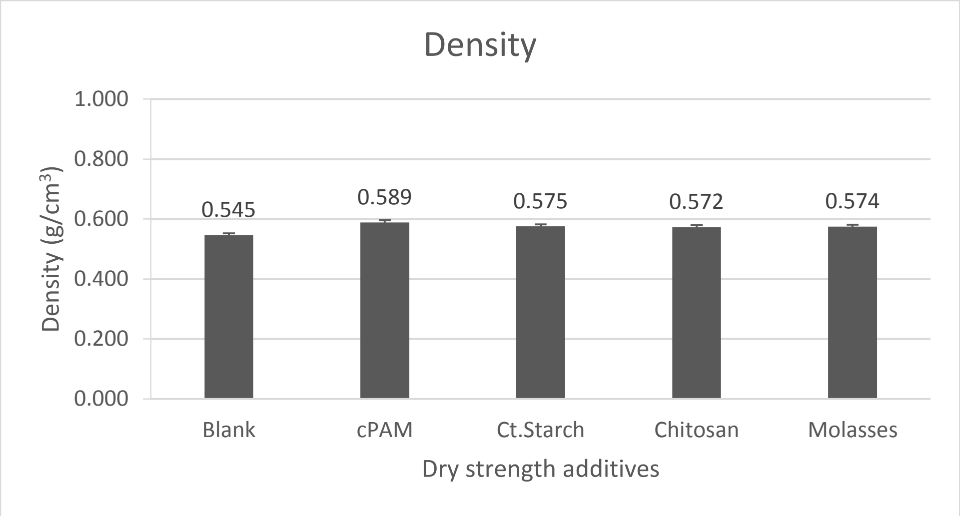
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	94.20909	4	23.55227	50.48935	1.35E-06	3.47805
Within Groups	4.6648	10	0.46648			
Total	98.87389	14				

ในการทดลองนี้ทำการวัดค่าความต้านทานอากาศของกระดาษโดยวัดการผ่านของอากาศที่ผ่านในโครงสร้างของกระดาษ นั่นคือรูพรุนของกระดาษ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4-23) พบว่าการใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่นๆ นั้นส่งผลให้ความพรุนของกระดาษมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งจากภาพที่ 4-25 และ ภาพที่ 4-26 พบว่าความต้านทานอากาศของกระดาษและค่าความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์นั้นให้ค่าสูงสุด ในขณะที่การใช้กากน้ำตาล แป้งประจุบวก และไคโตซานนั้นให้ค่าที่อยู่ในช่วงที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan (ดังแสดงในตารางที่ 4.18)

พบว่าการใช้กากน้ำตาลนั้นให้ค่าความต้านทานอากาศที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับแป้งประจุบวกและไคโตซาน แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์



ภาพที่ 4-25 ความต้านทานอากาศของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 4-26 ความหนาแน่นของกระดาษที่ใช้กากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดอื่น

ในภาพรวมจะเห็นได้ว่าผลการทดลองนี้ได้มีปริมาณการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์และแป้งประจุบวกที่เหมาะสมสำหรับเยื่อคือที่ปริมาณร้อยละ 0.7 และ 2.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้งตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงปริมาณการใช้ที่ได้รับการแนะนำจากบริษัทผู้ขายสารเพิ่มความแข็งแรงดังกล่าว นั่นคือ ปริมาณแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่เหมาะสมคือประมาณร้อยละ 7 และแป้งประจุบวกประมาณร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นที่ทางบริษัทนั้นๆได้ทำการแนะนำมาเป็นช่วงความเข้มข้นที่กว้าง ทำให้ไม่สามารถทราบว่าความเข้มข้นเท่าใดที่เหมาะสมและสามารถเพิ่มสมบัติของกระดาษที่ทำจากเยื่อชนิดเดียวกับในการทดลองนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดต่องานวิจัยชิ้นนี้

อย่างไรก็ตาม การขึ้นแผ่นในการทดลองนี้ กระดาษที่ได้นั้นไม่ได้มีสารเติมแต่งหรือสารเคมีอื่นๆที่ได้มีการใช้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ จึงอาจทำให้ผลการทดลองบางส่วนมีความคลาดเคลื่อนจากที่ควรจะเป็นเล็กน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มทุนของวัตถุดิบ

จากผลการทดลองการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ร้อยละ 0.7 แป้งประจุบวกร้อยละ 2.0 ไคโตซานร้อยละ 0.75 และกากน้ำตาลร้อยละ 20 ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของกระดาษนั้นมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดเดียวกันในระดับที่ต่างกัน ซึ่งเมื่อนำค่าความแข็งแรงดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับในกรณีที่กระดาษไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลยเพื่อดูร้อยละคามแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4.24 ร้อยละความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สารเพิ่มความแข็งแรง

	Tensile		Tear		Ring crush	
	Strength (Nm/g)	% increase	Strength (mNm^2/g)	% increase	Strength (kN/m)	% increase
Blank	33.75	-	5.58	-	1.17	-
cPAM	40.72	20.65	6.24	11.83	1.72	47.01
Cationic starch	38.71	14.70	5.94	6.45	1.66	41.88
Chitosan	39.26	16.33	6.11	9.50	1.64	40.17
Molasses	38.20	13.19	5.85	4.84	1.55	32.48

สำหรับตารางที่ 4-25 นี้แสดงถึงปริมาณที่เหมาะสมสำหรับเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ได้จากการทดลองนี้ เทียบกันกับราคาของสารเพิ่มความแข็งแรงแต่ละชนิด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.25 ราคาและปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดต่างๆ

	ปริมาณที่เหมาะสม (กิโลกรัม/ตันเยื่อ)	**ราคา (บาท/กิโลกรัม)**	**มูลค่า (บาท/ตันเยื่อ)**
cPAM	7	40	280
Cationic starch	20	23	460
Chitosan	7.5	35	262.50
Molasses	200	6	1,600

ข้อมูลจากตารางที่ 4-24 และ ตารางที่ 4-25 เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากกระดาษที่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดต่างๆกับกระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงใดเลย พบว่า กระดาที่ใส่แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์มีร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงสูงสุด ส่วนกระดาษที่ใส่กากน้ำตาลนั้นมีร้อยละการเพิ่มขึ้นที่น้อยสุด และเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของสารเพิ่มความแข็งแรงที่ใช้ในการทดลองแล้ว พบว่า แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์นั้นมีราคาที่แพงสุด แต่ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้นั้นน้อยที่สุด อีกทั้งยังให้ร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงที่สูงสุดอีกด้วย ในขณะที่กากน้ำตาลนั้นแม้จะมีราคาที่ถูกที่สุด แต่ปริมาณในการใช้นั้นมากสุด และร้อยละการเพิ่มขึ้นยังน้อยสุด จึงสรุปได้ว่า สารเพิ่มความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษและมีความคุ้มทุนที่สุดนั้น คือ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษและเปรียบเทียบความแข็งแรงกับกระดาษที่ใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่น 3 ชนิด ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน ได้ผลการทดลองดังสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งสำหรับกระดาษ

ผลการทดลองการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน ซึ่งสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่กระดาษให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนสูงที่สุด ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 0.7 แป้งประจุบวกที่ปริมาณร้อยละ 2.0 และไคโทซานที่ปริมาณร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เนื่องจากค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน เป็นการทดสอบความแข็งแรงที่ขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยเป็นสำคัญ จึงเลือกที่จะใช้ค่าความแข็งแรงดังกล่าวนี้ในการเลือกปริมาณการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่ให้ค่าความแข็งแรงดังกล่าวสูงที่สุด และนำปริมาณการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงนั้นเป็นตัวเปรียบเทียบกับการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

5.1.2 การเปรียบเทียบการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งกับการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดอื่น

เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่ไม่ได้ใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งใดเลย การใช้กากน้ำตาลมีแนวโน้มที่สามารถเพิ่มสมบัติด้านความเรียบของกระดาษ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน ความต้านทานการโค้งงอและความต้านทานอากาศไหลผ่านได้ โดยค่าความแข็งแรงดังกล่าวนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าความต้านทานแรงฉีกนั้น พบว่า การใช้กากน้ำตาลนั้นทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยความเข้มข้นของกากน้ำตาลที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดคือที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

เมื่อเปรียบเทียบการใช้กากน้ำตาลกับสารเพิ่มความแข็งแรง 3 ชนิด คือ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แป้งประจุบวก และไคโตซาน ด้วย ANOVA พบว่าการใช้กากน้ำตาลส่งผลต่อ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความเรียบ ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน ความต้านทานการโค้งงอ และความต้านทานอากาศของกระดาษ โดยผลที่ได้นั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \le 0.05$) กับการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงทั้ง 3 ชนิด แต่ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้กากน้ำตาลนั้นสามารถเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสารเพิ่มความแข็งแรงที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษแล้วนั้น กากน้ำตาลไม่สามารถให้ค่าความแข็งแรงที่มากกว่าสารเพิ่มความแข็งแรงอื่นๆได้ เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้วยวิธี Duncan พบว่า การใช้กากน้ำตาลให้ค่าความแข็งแรงที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \le 0.05$) กับการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ แต่ให้ค่าที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการใช้แป้งประจุบวกและไคโตซาน ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ถึงความคุ้มทุนพบว่าแม้กากน้ำตาลจะให้ค่าความแข็งแรงที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับแป้งประจุบวกและไคโตซานก็ตาม แต่การใช้กากน้ำตาลไม่มีความคุ้มทุนในการนำมาใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษเนื่องมาจากร้อยละการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของกระดาษที่น้อยกว่าและปริมาณการใช้ที่มากกว่า ซึ่งสารเพิ่มความแข็งแรงที่มีความคุ้มทุนทั้งในด้านต้นทุนและสมบัติด้านความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนั้น ได้แก่ แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

อย่างไรก็ตาม หากผู้ผลิตมีความต้องการที่จะผลิตกระดาษโดยไม่ได้มีขนาดใหญ่และปริมาณมากเท่าระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ หรือความแข็งแรงของกระดาษที่ต้องการนั้นไม่ได้อยู่ในระดับที่สูงมาก ผู้ผลิตก็สามารถที่จะใช้กากน้ำตาลซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงขณะแห้งของกระดาษมาใช้ในการผลิตได้ ทั้งนี้ ผู้ผลิตควรที่จะพิจารณาถึงปริมาณของกากน้ำตาลที่ใช้และความคุ้มทุนของการผลิตด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 อาจนำกากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งชนิดต่างๆมาใช้งานร่วมกัน เพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันระหว่างกากน้ำตาลและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

5.2.2 อาจลองใช้เยื่อกระดาษที่แตกต่างกันเพื่อดูว่าเยื่อชนิดใดให้ค่าความแข็งแรงขณะแห้งที่มากกว่าจากการใช้กากน้ำตาลในระดับที่เท่ากัน

รายการอ้างอิง

1. Fahmy, T.Y.A., *Introducing molasses as a new additive in papermaking.* TAPPI Journal, 2007. **6**(8).
2. Alireza Ashori, et al., *Utilization of sugarcane molasses as a dry-strength additive for old corrugated container recycled paper.* Composites: Part B, 2012. **45**: p. 1595-1600.
3. Holik, H., *Handbook of paper and boards*. 2006, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
4. Biermann, C.J., *Handbook of pulping and papermaking*. second ed. 1996, Toronto: Academic Press, Inc.
5. Higham, R.R.A., *A handbook of paper making: The technology of pulp, paper and board manufacture*. 1968, London: Business Books ltd.
6. Mckdandy. *Hardwood*. 2006 [cited 2016 December]; Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hard_Soft_Wood.jpg.
7. Roger M. Rowell and C. Cook, *Type and amount of nonwood fibers available in the U.S.* 1998 Tappi north America Nonwood Fiber Symposium, 1998: p. 43-47.
8. N. Svenningsen, et al., *Cleaner product in the pulp and paper industry: Technology fact sheets. Asian Institute of Technology and the United Nations Environment Programme (UNEP).* 1999.
9. Menachem Lewin and Irving S. Goldstein, *Wood structure and composition*. 1991, New York: Marcel Dekker, Inc.
10. Wardrop, A.B., *Morphological Factors Involved in the Pulping and Beating of Wood Fibres.* Svensk Papperstidning, 1963. **66**: p. 231-247.
11. Farrell, R. *Plant Structure & Function*. [cited 2016 December]; Available from: http://sci.waikato.ac.nz/farm/content/plantstructure.html#Plant_cell_structure.
12. *Di- and Polysaccharides*. [cited 2016 December]; Available from: http://chemistry2.csudh.edu/rpendarvis/dipolysacch.html.

13. Engineering, D.o.C. *Energy*. [cited 2016 December]; Available from: http://www.cheresearch.engin.umich.edu/savage/energy.html.
14. Sjöström, E., *Wood chemistry*. Fundamentals and applications. 1993, Toronto: Academic Press, Inc.
15. Lew Paul Christopher, B.Y. and Y. Ji, *Lignin biodegradation with laccase-mediator systems*, fenrg-02-00012-g001.jpg, Editor. 2014.
16. Smook, G.A., *Handbook for pulp and paper technologists*. 1986, Atlanta: Ga TAPPI.
17. Selke, S.E.M., *Packaging and the environment: Alternatives, trends and Solutions*. 1994, Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc.
18. ตรีภพนาถ, น., การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังเพื่อการทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก, in สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. brainpacking.com. *Corrugated Fiberboard Box*. [cited 2017 January]; Available from: http://www.brainpacking.com/customize-%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%94%E0%B8%B2%E0%B8%A9%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B8%81%E0%B8%9F%E0%B8%B9%E0%B8%81(CorrugatedPaper)-27209-1.html.
20. การออกแบบบรรจุภัณฑ์. [cited 2016 20 December]; Available from: https://sites.google.com/site/brrcuphanthklxngkradas/3-kar-xxkbaeb-klxng-kradas-phab.
21. Alireza Ashori , et al., *Enhancing dry-strength properties of kenaf (Hibiscus cannabinus) paper through chitosan.* Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2006. **45**(1): p. 125–129.
22. Hubbe, M. *Mini-Encyclopedia of Papermaking Wet-End Chemistry*. [cited 2016 December]; Available from: http://www4.ncsu.edu/~hubbe/COPL.htm.
23. Academy, S. *The Molecules of Life*. 2012 [cited 2016 November]; Available from: https://saylordotorg.github.io/text_general-chemistry-principles-patterns-and-applications-v1.0/s28-06-the-molecules-of-life.html.
24. Hubbe, M. *Mini-Encyclopedia of Papermaking Wet-End Chemistry* [cited 2016 December]; Available from: http://www4.ncsu.edu/~hubbe/CST.htm.

25. แสงอุไร, ศ., การสกัดแยกพอลิเมอร์ชีวภาพจากครัสเตเซียน การเตรียมอนุพันธ์ และการใช้ดูดซับสารเคมีบางชนิด, in สาขาวิชาเคมีศึกษา คณะวิทยาศาสตร์. 2549, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
26. Majeti, R.K.N., *A review of chitin and chitosan applications* Reactive and Functional Polymers, 2000. **46**(1): p. 1-27.
27. Fibre2Fashion.com. *Application of Chitin Fibre*. [cited 2016 November]; Available from: http://www.fibre2fashion.com/industry-article/3748/miracle-fibre-chitin.
28. Carlson, D.A. [SVG] 2007 [cited 2017 January]; Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sucrose-inkscape.svg.
29. Curtin, L.V., *Molasses - General Considerations*, in *Molasses in Animal Nutrition*. 1983: West Des Moines.
30. Agriculture, D.o. *Food Composition Database Show Foods*. [cited 2016 25 October]; Available from: https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/6293?fgcd=&manu=&lfacet=&format=Full&count=&max=50&offset=&sort=default&order=asc&qlookup=19304&ds=.
31. Takeshi Hashizume, et al., *Constituents of Cane Molasses. Agricultural and Biological Chemistry.* Agricultural and Biological Chemistry, 1965. **30**(4): p. 319-329.
32. Browne., C.A., *The Composition and Calorific Value of Sirups and Molasses Derived from Sugar Cane.* 1919: p. 1432-1440.
33. Olbrich, H., *The Molasses*. 1963: Berlin.
34. แก้วแกมเสือ, ก., การศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการหมักกากน้ำตาลในโรงงานบริษัท แสงโสม จำกัด จ.กาญจนบุรี, in สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์. 2547, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
35. thaisugarmill. [cited 2017 January]; Available from: http://www.thaisugarmill.com/.
36. Yahya Hamzeh, et al., *Improving wet and dry strength properties of recycled old corrugated carton (OCC) pulp using various polymers.* Carbohydrate Polymers, 2013. **94**: p. 577-583.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

37. Ali Ghasemian, Mansour Ghaffari, and Alireza Ashori, *Strength-enhancing effect of cationic starch on mixed recycled and virgin pulps.* Carbohydrate Polymers, 2011. **87**: p. 1269-1274.

38. Min Zhang, et al., *Effects of Sugar Addition Before Drying on the Wet-Flexibility of Redispersed Kraft fibers.* Journal of Pulp and Paper Science, 2004. **30**(1): p. 29-34.

39. Tamer Y.A. Fahmy and F. Mobarak, *Advanced nano-based manipulations of molasses in the cellulose and paper discipline: Introducing a master cheap environmentally safe retention aid and strength promoter in papermaking.* Carbohydrate Polymers, 2008: p. 316–319.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

คุณลักษณะของสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่ใช้ในงานวิจัย

1. แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

ตาราง ก คุณลักษณะของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

Properties	Cationic polyacrylamide
Salt viscosity	3.8-4.5 mPas (0.1%, 25°C, 1 M NaCl)
Appearance	white, hygroscopic, odorless powder)
Chemical composition	polyacrylamide
Ionic character	cationic
Solubility	good
Particle size distribution	>2.0 mm max. 1% <0.15 mm max. 4%

2. แป้งประจุบวก

ตาราง ข คุณลักษณะของแป้งประจุบวก

Properties	Cationic starch
Color	White
Form	Powder
Moisture	14.0% maximum
pH	5.0-7.0 (20% starch surry in distilled water)
Whiteness KETT	85% minimum
Degree Substitution	0.026 minimum

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. ไคโตซาน

ตาราง ค คุณลักษณะของไคโตซาน

Properties	Chitosan
Form	Flake
Degree of deacetylation	95%
Molecular weight	75000 g/mol
Supplier	S.Y.K. Enterprise Co.,Ltd

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข

การเตรียมเยื่อ

1. การคำนวณการบดเยื่อโดยใช้เครื่องบดเยื่อ Valley beater

$$\text{Consistency} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง } (g)}{\text{น้ำหนักเยื่อรวม } (g)} \times 100$$

$$= \frac{360}{23000} \times 100$$

$$= 1.57\%$$

2. การคำนวณน้ำหนักเยื่อและการเตรียมสำหรับทำแผ่นทดสอบ

ต้องการขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight หรือ grammage) เท่ากับ 80 g/m^2 โดยใช้วิธีขึ้นแผ่นแบบ Rapid Köthen มีวิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำหนักเยื่อที่ใช้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พื้นที่ของแผ่นทดสอบแบบ Rapid Köthen = πR^2

= $\pi D^2/4$

= 3.1428 x (0.2 m)^2 /4

= 0.031428 m^2

เนื่องจากต้องการขึ้นแผ่นทดสอบขนาด 120 g/m^2 โดยแผ่นทดสอบมีพื้นที่เท่ากับ 0.031428 m^2

ดังนั้นต้องใช้เยื่อต่อแผ่น = 80 g/m^2 x 0.031428 m^2

= 3.77136 g

เยื่อมีความเข้มข้น เท่ากับ 1.57% (ฉะนั้นจะต้องทราบความเข้มข้นของเยื่อก่อน) หากต้องใช้เยื่อแห้ง 3.77136 g จะมาจากเยื่อเปียกที่มีความเข้มข้น 1.57% เท่ากับ

ชั่งน้ำหนักเยื่อ = 100/1.57 x 3.77136 g

= 240. g

ในการเตรียมแผ่นทดสอบ 1 แผ่น ที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 120 g/m2 จากเยื่อที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.57% จะต้องใช้เยื่อ 240.13 g

<u>การเตรียมน้ำเยื่อเจือจางสำหรับขึ้นแผ่น</u>

เจือจางให้เยื่อมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5% ในการเตรียมแผ่นทดสอบ 10 แผ่น

ฉะนั้นต้องใช้เยื่อทั้งหมด = 240.13 g x 10

= 2400.g (ซึ่งเป็นเยื่อที่ความเข้มข้น 1.57%)

นำเยื่อมาเจือจางให้ได้ 0.5% โดยจะเท่ากับน้ำหนักเยื่อแห้ง = 3.77 g x 10

= 37.7 g

ฉะนั้น เยื่อแห้ง 37.7 g ที่ความเข้มข้น 0.5% มาจากน้ำเยื่อทั้งหมด = 100/0.5 x 37.4 g

= 7540 g

ฉะนั้นต้องเติมน้ำ = 7540 g – 2400 g

= 5140 g

<u>คำนวณกลับเพื่อตรวจสอบ</u>

เยื่อเปียก 2400 g + น้ำที่เติมเข้าไป 5140 g รวมเป็นน้ำหนักใหม่ 7540 g ซึ่งเยื่อนี้มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 37.7 g

ฉะนั้น เยื่อนี้จะมีความเข้มข้น = $\frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่อทั้งหมด}} \times 100$

= 0.5%

ในการเตรียมเยื่อที่ความเข้มข้น 0.5% สำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อ = $\frac{7540}{10}$

= 754 g

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวเบญจนาถ เจริญสุข เกิดเมื่อวันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนนทรีวิทยา

- ปี พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ผลงานวิชาการ

- Charoensook, B., Suvarnakich, K., Chaiarrekij, S. (2016). Use of molasses as dry strength additive for paper. The 5th Suan Sunandha Academic National Conference on "Research for Sustainable Development". 1 Dec 2016. Bangkok, Thailand. Pp. 153-159.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University