โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ความสามารถในการรีไซเคิลของถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์

Recyclability of Chula Zero Waste Paper Cup

ชื่อนิสิต นางสาวจิราวรรณ สุนันทะนาม **เลขประจำตัว** 6032602823

นางสาวนภัสวรรณ อาซาโนะ **เลขประจำตัว** 6032611423

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อโครงการวิทยาศาสตร์ชื่อ	ความสามารถในการรีไซเคิลของถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์
	(Recyclability of Chula Zero Waste Paper Cup)
โดย	นางสาว จิราวรรณ สุนันทะนาม เลขประจำตัว 6032602823
	นางสาว นภัสวรรณ อาซาโนะ เลขประจำตัว 6032611423
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับว่าโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์เรื่อง “ความสามารถในการรีไซเคิลของถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์” เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

.....หัวหน้าภาควิชาฯ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญดา เกตุเมฆ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

(ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ)

ผู้ดำเนินงาน นางสาว จิราวรรณ สุนันทะนาม เลขประจำตัว 6032602823
นางสาว นภัสวรรณ อาซาโนะ เลขประจำตัว 6032611423
ชื่อเรื่อง ความสามารถในการรีไซเคิลของถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ

บทคัดย่อ : ถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์เป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยผลิตขึ้นเพื่อแก้ปัญหาขยะพลาสติกภายในมหาวิทยาลัย โดยกระดาษจะถูกเคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้เอง ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความแตกต่างจากถ้วยกระดาษทั่วไปที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้เอง เมื่อมีการใช้ถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์มากขึ้น ทำให้ปริมาณขยะจากถ้วยกระดาษเพิ่มขึ้นตาม คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์มาผ่านกระบวนการรีไซเคิล เปรียบเทียบกับการรีไซเคิลถ้วยกระดาษทั่วไปที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน ตอนที่ 1 เป็นการหาภาวะที่เหมาะสมในการตีกระจายเยื่อจากถ้วยกระดาษ ได้เยื่อจากการตีกระจายทั้งหมด 4 ภาวะที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดกระดาษ พบว่า ปริมาณเยื่อที่ได้หลังจากการตีกระจายในแต่ละภาวะ ไม่ได้มีความแตกต่างกันมากในกระดาษทั้ง 2 ชนิด ในตอนที่ 2 ผู้วิจัยจึงเลือกเยื่อจากภาวะที่มีความรุนแรงต่ำที่สุดและสูงที่สุด มาวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใยและนำไปขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ จากนั้นได้ทดสอบสมบัติกระดาษทั้งหมด 7 สมบัติ และในตอนที่ 3 ได้นำเยื่อที่ได้จากการตีกระจายในภาวะที่มีความรุนแรงต่ำที่สุดของกระดาษทั้ง 2 ชนิดมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เยื่อขึ้นรูป โดยการนำกระชอนสแตนเลสมาประกบเยื่อไว้ จากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า กระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เมื่อถูกรีไซเคิลแล้ว ให้คุณภาพของเยื่อกระดาษที่ดีกว่า เส้นใยมีความแข็งแรงมากกว่า ในขณะที่กระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนไม่เหมาะกับการฝังกลบแต่เหมาะกับการนำไปรีไซเคิล ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษใหม่ เนื่องจากมีแนวโน้มของค่าการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ไปในทิศทางที่ดีกว่ากระดาษที่ได้จากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่อนิสิต.....นภัสวรรณ อาซาโนะ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาหลัก.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

Student name	Miss Jirawan Sununthanam	ID No. 6032602823
	Miss Napaswan Asano	ID No. 6032611423
Project name	Recyclability of Chula Zero Waste Paper Cup	
Project advisor	Dr. Kuntinee Suvarnakich	
Project co-advisor	Assist. Prof. Somporn Chaiarrekij	

Abstract : Chula zero-waste cup is a paper container which Chulalongkorn University invented to solve the plastic waste problem in the University. This environmentally friendly paper cup is made of paper coated with polybutylene succinate (PBS) which is a biodegradable plastic, as opposed to polyethylene (PE) which is not biodegradable. As Chula zero-waste cup is widely used, more paper waste is produced. This research aimed to study the feasibility of recylcing Chula zero-waste cup and compared it to commercial Polyethylene coated paper cup. The experiment was done in three steps. First, the best condition to disintegrate the pulp from the paper cup was determined. It was found that the pulp yield obtained from different conditions did not differ much in both types of coated paper. The pulp obtained from mild and harsh conditions were then selected for the second step where fiber morphology was studied and handsheets were made. The handsheets were tested for seven paper properties. For the last step, the pulp from PBS coated paper and PE coated paper disintegrated in the mild condition were formed into molded pulp product by engaging the pulp between two stainless steel colanders. From the experiments, we can conclude that the pulp obtained from the PBS coated cup gives stronger fibers, but its overall recycled paper properties are weaker than those from the recycled PE cup. So, Chula zero-waste cup, despite its stronger fibers, is more suitable for landfill comparing to the PE coated cup which could be recycled to produce better quality paper.

Department of Imaging and Printing Technology
Academic year : 2020

Student's signature.....
Student's signature.....Napaswan Asano.....
Advisor's signature.....
Co-advisor's signature.....

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

บทที่ 1 บทนำ

- ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....1
- วัตถุประสงค์ของโครงการ.....2
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- ถ้วยกระดาษ.....3
- การรีไซเคิล.....9
- พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....11
- การผลิตเยื่อกระดาษ.....12
- การขึ้นรูปแผ่นกระดาษ.....13
- สมบัติกระดาษ.....13

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

- วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....16
- วิธีการทดลอง.....17

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

- ผลการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการตีกระจายถ้วยกระดาษ.....19
- ผลการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย การขึ้นแผ่นกระดาษ และทดสอบสมบัติกระดาษ.....21
- ผลการนำเยื่อมาทดลองขึ้นรูปเป็นถ้วยกระดาษ.....32

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

- สรุปผลการทดลอง.....33
- ข้อเสนอแนะ.....34

เอกสารอ้างอิง.....35

ภาคผนวก.....38

ภาคผนวก ก.....39

ภาคผนวก ข.....46

ภาคผนวก ค.....50

ภาคผนวก ง.....56

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลผลิตที่ได้จากการตีกระจายเยื่อจากถ้วยกระดาษในภาวะที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4-1).....20

ตารางที่ 2 ค่าสัณฐานวิทยาของเส้นใย (ตารางที่ 4-2).....21

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของความหนากระดาษ (Thickness) (ตารางที่ 4-3).....22

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของความหนาแน่นกระดาษ (Density) (ตารางที่ 4-4).....23

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของเวลาที่อากาศซึมผ่านกระดาษ (ตารางที่ 4-5).....24

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าความเรียบกระดาษ (ตารางที่ 4-6).....25

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษ (Tear resistance) (ตารางที่ 4-7).....27

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (ตารางที่ 4-8).....28

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษ (ตารางที่ 4-9).....29

ตารางที่ 10 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าน้ำหนักน้ำ (Weight of water) (ตารางที่ 4-10).....31

หน้า

ตารางที่ 11 แสดงน้ำหนัก น้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ย ความหนา และความหนาแน่นของกระดาษ (ตารางที่ ค-1).....50

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานอากาศ (Air resistance) (ตารางที่ ค-2).....51

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบความเรียบ (Smoothness) (ตารางที่ ค-3).....51

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance) (ตารางที่ ค-4).....52

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) (ตารางที่ ค-5).....53

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting strength) (ตารางที่ ค-6).....55

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบสมบัติการซึมน้ำโดยวิธี Cobb test (ตารางที่ ค-7).....55

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน (PE).....4
ภาพที่ 2 โครงสร้างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS).....6
ภาพที่ 3 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของกระดาษ (ภาพที่ 4-1).....23
ภาพที่ 4 กราฟแสดงเวลาที่อากาศซึมผ่านกระดาษ (ภาพที่ 4-2).....24
ภาพที่ 5 กราฟแสดงค่าความเรียบของกระดาษ (ภาพที่ 4-3).....26
ภาพที่ 6 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษของกระดาษ (ภาพที่ 4-4).....27
ภาพที่ 7 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ (ภาพที่ 4-5).....28
ภาพที่ 8 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษ (ภาพที่ 4-6).....30
ภาพที่ 9 กราฟแสดงค่าการทดสอบสมบัติการซึมน้ำโดยวิธี Cobb Test (ภาพที่ 4-7).....31
ภาพที่ 10 ภาพแสดงลักษณะของถ้วยที่ได้จากการขึ้นรูปน้ำเยื่อกระดาษทั้ง 2 ชนิด (ภาพที่ 4-8).....32
ภาพที่ 11 เครื่องบดเยื่อ (Valley beater) (ภาพที่ ก-1).....39
ภาพที่ 12 เครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrator) (ภาพที่ ก-2).....39
ภาพที่ 13 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former) (ภาพที่ ก-3).....40
ภาพที่ 14 เครื่องวัดความชื้น (Moisture determination balance) (ภาพที่ ก-4).....40
ภาพที่ 15 เครื่องวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber Quality Analyzer) (ภาพที่ ก-5).....41
ภาพที่ 16 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (Thickness tester) (ภาพที่ ก-6).....41
ภาพที่ 17 เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester) (ภาพที่ ก-7).....42
ภาพที่ 18 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester) (ภาพที่ ก-8).....42
ภาพที่ 19 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Tear tester) (ภาพที่ ก-9).....43
ภาพที่ 20 เครื่องวัดความพรุน (Porosity tester) (ภาพที่ ก-10).....43
ภาพที่ 21 อุปกรณ์ทดสอบการซึมน้ำ (Cobb sizing tester) (ภาพที่ ก-11).....44
ภาพที่ 22 ตะแกรงร่อนเยื่อ (ภาพที่ ก-12).....44
ภาพที่ 23 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH meter) (ภาพที่ ก-13).....45
ภาพที่ 24 ตู้อบ Venticell, Germany (ภาพที่ ก-14).....45
ภาพที่ 25 เยื่อเปียกและเยื่อแห้งที่ได้จากการตีกระจาย (ภาพที่ ง-1).....56
ภาพที่ 26 พลาสติกทั้ง 2 ชนิดที่ใช้เคลือบกระดาษ หลังผ่านการตีกระจายและอบให้แห้ง (ภาพที่ ง-2).....56

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเสริมประสบการณ์การเรียนรู้ด้วยตนเอง เรื่อง ความสามารถในการรีไซเคิลของถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ (Recyclability of Chula Zero Waste Paper Cup) นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรี เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ ประจำปีการศึกษา 2563 ของภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โครงการนี้สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากหลายท่าน คณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีรายนามดังต่อไปนี้เป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

1. อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ สำหรับคำแนะนำ แนวทางการทดลองและแก้ไขปัญหา ไปจนถึงข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ และความช่วยเหลือต่าง ๆ จนทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

2. ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและทดลอง

3. คุณวรุณ วารัญญานนท์ ที่ปรึกษาเพื่อภาคีอุตสาหกรรม ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) และบริษัท ไทย เคเค อุตสาหกรรม จำกัด สำหรับคำแนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน และกระดาษที่ไม่มีสารเคลือบ

4. คุณอติกานต์ ไกรโชค และคุณกฤติน กุลรัตนรักษ์ สำหรับความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์สำหรับการศึกษาและทดลอง ทำให้การดำเนินโครงการนี้เป็นไปได้อย่างราบรื่น

5. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินทุนสนุบสนุนโครงการนี้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

พลาสติกเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และยังมีธาตุอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบย่อย เช่น กำมะถัน ฟลูออรีน คลอรีน และไนโตรเจน เป็นต้น นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม ทนทาน สีสันสวยงาม และมีหลากหลายประเภท ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พลาสติกกลายเป็นขยะที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก และกำจัดได้ยาก เนื่องจากขยะพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายที่นาน ส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองทางธรรมชาติ อีกทั้งวิธีการจัดการขยะประเภทดังกล่าวในปัจจุบันที่ไม่มีประสิทธิภาพ ดังเช่น การเผาทิ้ง ซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ หรือการฝังกลบ ที่ทำให้เกิดภาวะการปนเปื้อนสารพิษในดิน และสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการฝังกลบ หนึ่งในวิธีการที่ดีและเหมาะสมสำหรับการกำจัดขยะพลาสติก คือ การนำกลับมารีไซเคิล ซึ่งเป็นการแปรรูปขยะพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ใหม่ได้ แต่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้งานไปจากเดิม เช่น การนำไปหลอมแล้วขึ้นรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ หรือสิ่งของต่าง ๆ เป็นต้น และอีกหนึ่งวิธีที่ดี คือ การใช้วัสดุทดแทน อย่างการใช้ถ้วยกระดาษแทนแก้วพลาสติก ก็เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะวัสดุประเภทกระดาษสามารถย่อยสลายได้ง่ายและเร็วกว่าวัสดุประเภทพลาสติก อีกทั้งยังมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า

กระดาษเป็นวัสดุที่ผลิตจากเยื่อหรือเส้นใยธรรมชาติ นำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ ในปัจจุบันเรามักจะเห็นการนำกระดาษมาใช้เป็นวัสดุทดแทนพลาสติก ในการผลิตสิ่งของต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นบรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์สำนักงาน หรือแม้แต่เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ เป็นต้น โดยในหลายบริษัทเริ่มให้ความสนใจที่จะเปลี่ยนเป็นวัสดุดังกล่าวในการผลิตสิ่งของ เพื่อตอบสนองการรณรงค์อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมด้วยการลดการใช้พลาสติกลง แล้วหันไปใช้วัสดุชนิดอื่นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น อย่างไรก็ตามกระดาษเป็นวัสดุที่ไวต่อความชื้น หากนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับของเหลวจำเป็นต้องมีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มสมบัติกันน้ำเสียก่อน ถ้วยกระดาษส่วนใหญ่ในปัจจุบันถูกผลิตโดยการใช้พลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน (PE) ในการเคลือบ ซึ่งใช้เวลาในการย่อยสลายที่นาน ไม่สามารถย่อยสลายได้เอง และเมื่อย่อยสลายแล้ว ก็ยังมีสารไมโครพลาสติกตกค้าง และก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาขยะพลาสติกของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปัจจุบันที่มีอยู่จำนวนมาก และกำจัดได้ยาก เนื่องมาจากสมบัติของพลาสติกที่กล่าวไปข้างต้น เพื่อเป็นการลดการใช้พลาสติก ทางมหาวิทยาลัยจึงได้มีการผลิตถ้วยกระดาษออกมาใช้ ภายใต้ชื่อ “Chula Zero Waste Paper Cup” หรือ “แก้วไบโอพีบีเอส (BioPBS)” ที่มีการนำกระดาษมาเคลือบด้วยพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้เอง (Biodegradable plastics) ได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์น้ำมันถั่วเหลือง (Soy Ink) การที่โครงการจุฬาซีโร่เวสต์เลือกใช้พลาสติกชีวภาพอย่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาใช้ในการเคลือบถ้วยกระดาษแทนพลาสติกพอลิเอทิลีน นอกจากจะช่วยป้องกันการซึมน้ำได้ดีแล้ว ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เนื่องจากผลิตด้วยพืชระยะสั้น เช่น ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น ทำให้สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ไม่ก่อให้เกิดสิ่งตกค้างที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และย่อยสลายได้เร็ว โดยถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ได้มีการนำมาใช้จริงภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแล้ว พบว่าสามารถช่วยลดการใช้พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง อีกทั้งยังช่วยลดงบประมาณและเวลาในการจัดการขยะประเภทแก้วพลาสติก สามารถนำมาผลิตเป็นปุ๋ยหมักและใช้บำรุงเลี้ยงดูต้นไม้ภายในมหาวิทยาลัย ไปจนถึงถูกใช้แทนถุงพลาสติกในการเพาะชำพืช

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีผู้ริเริ่มนำกระดาษที่เคลือบด้วยพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาทดลองรีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นเยื่อกระดาษใหม่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระดาษที่เคลือบด้วยพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจากด้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์มาผ่านกระบวนการรีไซเคิลจนออกมาเป็นเยื่อกระดาษ แล้วนำไปสู่การขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษใหม่ และทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อนำไปประยุกต์การใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์เยื่อกระดาษขึ้นรูปในอนาคต ซึ่งถือเป็นการพัฒนาวิธีในการจัดการปัญหาขยะที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในมหาวิทยาลัยให้ลดน้อยลงได้อีกทาง นอกเหนือไปจากการนำถ้วยกระดาษดังกล่าวมาผลิตเป็นปุ๋ยหมัก หรือนำไปใช้ในการเพาะชำพืชแทนถุงพลาสติก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้ทราบถึงภาวะที่เหมาะสมในการนำกระดาษจากถ้วยกระดาษไปตีกระจายเป็นเยื่อ

1.3.2 ได้ทราบแนวทางการตีกระจายเยื่อ การขึ้นรูปกระดาษ การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษ ไปจนถึงได้ทดลองขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เยื่อขึ้นรูป (Molded pulp)

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ้วยกระดาษ

ถ้วยกระดาษ หรือ แก้วกระดาษ เป็นบรรจุภัณฑ์รักษ์โลกและเป็นบรรจุภัณฑ์ทางเลือกให้กับผู้บริโภค แทนการใช้ถ้วยพลาสติก ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนาน หากกำจัดอย่างไม่ถูกวิธีอาจก่อปัญหาด้านมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งถ้วยกระดาษสามารถใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้ (Disposal Items) ไม่ต้องล้างทำความสะอาด จึงเกิดความสะดวกในการใช้งานต่อผู้บริโภคมากกว่าถ้วยพลาสติก ถ้วยสแตนเลส เป็นต้น และถ้วยกระดาษยังมีน้ำหนักที่เบา ขนย้ายได้ง่าย

เดิมทีบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ใช้วัตถุดิบในการเคลือบผิวจากไข หรือ Wax จึงถูกเรียกว่า “แก้วเทียน” ซึ่งอาจทำให้เกิดสารปนเปื้อนลงไปในอาหารได้ และทำให้ตัวถ้วยเก็บความร้อนได้ไม่ดี อุณหภูมิของเครื่องดื่มที่บรรจุไม่เสถียร ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาถ้วยกระดาษ ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากกระดาษที่ถูกเคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) ซึ่งช่วยให้ผิวของถ้วยกระดาษสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ นอกจากนี้ถ้วยกระดาษก็ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีในด้านอื่น เพื่อให้ผู้บริโภคสามารถใช้งานได้ดี ปลอดภัย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น [3]

2.1.1 องค์ประกอบของถ้วยกระดาษ

2.1.1.1 กระดาษ

ถ้วยกระดาษโดยทั่วไปผลิตจากเยื่อกระดาษบริสุทธิ์ 100% จากวัสดุธรรมชาติ เช่น เส้นใยไม้เนื้ออ่อน (Softwood fiber, SW) ซึ่งได้จากพืชตระกูลสนเป็นส่วนใหญ่ เช่น สนสองใบ สนสามใบ Fir Pine Spruce เป็นต้น ให้เส้นใยมีขนาดยาว แต่มีการเจริญเติบโตที่ช้า อีกทั้งพืชตระกูลสนยังไม่สามารถปลูกได้มากในประเทศไทย เนื่องจากเป็นพืชเมืองหนาว ประเทศไทยจึงต้องมีการนำเข้าพืชดังกล่าวมาจากต่างประเทศ หรืออาจใช้เป็นพวกพืชล้มลุกแทน แต่อาจให้ผลได้ไม่ดีเท่า

เส้นใยไม้เนื้อแข็ง (Hardwood fiber, HW) จากไม้กระถิน [17] ให้เส้นใยมีขนาดสั้น เป็นพืชตระกูลไม้ผลัดใบ มีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างรวดเร็ว

เส้นใยไม้เนื้ออ่อนให้ความแข็งแรงได้มากกว่าเส้นใยไม้เนื้อแข็ง เนื่องจากการมีขนาดของเส้นใยที่ยาวกว่า ทำให้มีพื้นที่ในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยมากกว่า แต่จะให้ผิวหน้าที่หยาบกว่า และความทึบแสงน้อย [19]

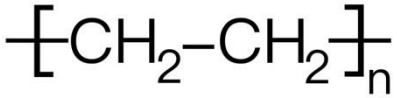
กระดาษที่ใช้ในการผลิตถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์เป็นกระดาษชนิดพิเศษที่สามารถย่อยสลายได้เอง โดยอาจใช้ไม้ในการผลิตชนิดเดียวกับถ้วยกระดาษทั่วไป แต่สำหรับสารยึด (Adhesive หรือ Binder) ที่ทำหน้าที่ปรับความหนืดของสารเคลือบผิวให้ได้ตามที่ต้องการ และเพื่อลดการซึม (Penetration) ของสารเคลือบผิวเข้าไปในเนื้อกระดาษนั้น ถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ใช้สารยึดคนละชนิดกับถ้วยกระดาษทั่วไป จึงทำให้ผิวหน้าของกระดาษสองชนิดมีความแตกต่างกัน โดยถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ใช้สารยึดชนิดหนึ่งที่เป็นตระกูล Latex อยู่ในกลุ่มของ Synthetic binder ให้ความต้านทานน้ำ (Water resistance) สูง [20] สามารถย่อยสลายได้เอง และเป็นอาหารของจุลินทรีย์ ในขณะที่ถ้วยกระดาษทั่วไปจะใช้สารยึดที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เอง ทำให้ตัวถ้วยกระดาษมีความคงทนมากกว่า แต่วิธีการกำจัดก็จะยากกว่า

กระดาษสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติภายในเวลา 4 - 6 เดือน หรือหากทำการตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ และนำไปทิ้งไว้ตามโคนต้นไม้ จะทำให้ย่อยสลายได้ภายในเวลาไม่เกิน 12 เดือน เป็นอาหารให้กับจุลินทรีย์ได้โดยทั้งหมด ไม่มีสารเคมีปนเปื้อนไปกับดิน น้ำ อากาศ หรือสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ [15]

2.1.1.2 สารเคลือบ

2.1.1.2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE)

ถ้วยกระดาษโดยทั่วไป มักใช้พอลิเอทิลีน (PE) เป็นสารเคลือบ พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ตระกูลพอลิโอลีฟิน (Polyolefins) มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 1 สังเคราะห์ได้จากสาร Aliphatic Hydrocarbon ที่ไม่อิ่มตัว ผ่านกระบวนการขจัดน้ำ (Dehydration) ของเอทานอล (Ethanol) หรือกระบวนการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ของอะเซทิลีน (Acetylene) โดยวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น แก๊สธรรมชาติ หรือกากน้ำตาลที่จะได้มาในรูปของเอทานอล



ภาพที่ 1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน (PE)

[ที่มา: https://sites.google.com/site/plastic9911/pe-plastic]

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Polymers) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นของพันธะ C – C ทำให้มีค่า T_g (Glass Transition Temperature) ต่ำ และผลึกของพอลิเอทิลีนมีค่า T_g ตั้งแต่ -130 องศาเซลเซียสถึง 60 องศา

เซลเซียส จึงทำให้พอลิเอทิลีนมีความยืดหยุ่นและมีความแข็งในสภาวะปกติตามแต่ละชนิดที่อุณหภูมิห้อง จะไม่ละลายในตัวทำละลายทุกชนิด แต่หากมีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสขึ้นไปจึงจะสามารถละลายได้ในตัวทำละลาย เช่น โทลูอีน (Toluene) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นต้น

ความใสของพอลิเอทิลีนจะแปรผกผันกับความหนาแน่น คือ หากพอลิเอทิลีนมีความหนาแน่นสูง จะให้ความใสน้อยหรือขุ่น พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำจะให้ความใสมาก สามารถทนต่อกรด ด่าง หรือสารเคมีอื่น ๆ ได้ดี แต่ทนความร้อน น้ำมัน และไขมันได้น้อย ไม่มีความเป็นขั้ว จึงสามารถเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี มีความลื่น ไม่มีกลิ่นและรส สามารถลอยน้ำได้ เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ สำหรับความเหนียวและความแข็งจะแปรผันตรงกับความหนาแน่น พอลิเอทิลีนสามารถป้องกันความชื้นไม่ให้ผ่านเข้าออกได้ แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้ มีความทนต่อการฉีกขาดที่ดี และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก [24]

โดยความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนมีทั้งหมด 3 ระดับ สามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลายตามความคุณสมบัติ ได้แก่

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low – Density Polyethylene : LDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลักษณะเป็นสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นหรือความมันในตัวเอง ถูกผลิตโดยใช้แรงดันสูง สามารถนำออกมาเป็นแผ่นแล้วใช้งานได้ง่าย ยืดหยุ่นสูง ฉีกขาดได้ ทนต่อการกรอบแตกและสารเคมีได้ดี สามารถป้องกันการขาดหรือแรงทะลุได้ แต่ทนความร้อนได้ไม่สูงมาก เพราะอุณหภูมิสูงสุดที่ LDPE สามารถทนได้อยู่ที่ 80 ถึง 95 องศาเซลเซียส เริ่มหลอมตัวที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส สามารถทนความเย็นได้สูงสุดที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส ราคาไม่สูงมาก จึงเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด ใช้งานได้ทั้งในครั้วเรือนและในอุตสาหกรรม มักถูกนำมาผลิตเป็นฟิล์มยืด ฟิล์มหด ฝาขวดน้ำ ขวดน้ำ และของเล่น

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium – Density Polyethulene : MDPE หรือ Linear Low – Density Polyethylene : LLDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.93 ถึง 0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดนี้อยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE แต่จะมีความนิ่มและเหนียวมากกว่า LDPE และ HDPE ถูกนำไปใช้งานในด้านของการเพิ่มความแข็งแรงเป็นหลัก สามารถทนความร้อนและสารละลายได้ดี นิยมนำมาผลิตเป็นท่อแก๊ส แก้วพลาสติก ท่อน้ำ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่เราใช้กันในปัจจุบัน และมักถูกใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ๆ เช่น บรรจุอาหารแช่เย็นหรือแช่แข็ง เป็นต้น

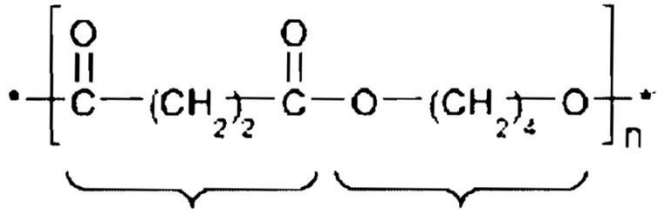
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High – Density Polyethylene : HDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.95 ถึง 0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความแข็งแรงและทนทาน

มากกว่า LDPE และ MDPE เพราะมีโมเลกุลภายในที่ยึดเกาะกันและเชื่อมกันอย่างหนาแน่น แต่จะมีความโปร่งแสงน้อยกว่า ทนต่อสารเคมีและสารละลายต่าง ๆ สามารถหลอมและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุของท่อส่งสารเคมี หีบห่อที่มีความแข็งแรงมาก ขวดน้ำยาหลายชนิด บรรจุภัณฑ์ทัพเพอร์แวร์ที่ทนความร้อนได้ดี ไปจนถึงชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือรถยนต์ [23]

2.1.1.2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate : PBS)

ถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate : PBS) เป็นสารเคลือบ โดยเคลือบทั้งด้านในและด้านนอกของถ้วยกระดาษขนาด 16 และ 22 ออนซ์ สำหรับใส่เครื่องดื่มเย็น และเคลือบเฉพาะด้านในของถ้วยกระดาษขนาด 8 ออนซ์ สำหรับใส่เครื่องดื่มร้อน

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ประเภท Aliphatic Polyester มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2 สังเคราะห์ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ระหว่างกรดซัคซินิค (Succinic acid) และ 1,4 - บิวเทนไดออล (1,4 - Butanediol) ด้วยปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation polymerization) [10] ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ได้จากแหล่งปิโตรเคมี พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงมีอัตราการสลายตัวที่ช้ากว่าพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid : PLA) หรือพลาสติกชีวภาพทั่วไปที่ได้จากการสังเคราะห์วัตถุดิบทางธรรมชาติ



ภาพที่ 2 โครงสร้างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate : PBS)
[ที่มา: https://tdc.thailis.or.th/tdc/browse.php]

โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นโซ่ตรง มีหมู่เอสเทอร์เป็นองค์ประกอบ ทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลว (Melting temperature) และมีความเป็นผลึกสูง ทนความร้อนได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส ขึ้นรูปได้ง่ายเหมือนเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic polymers) ทั่วไป มีสมบัติเชิงกลคล้ายพอลิเอทิลีน และมีความแข็งแรงมากกว่าพอลิแลคติกแอซิด จึงนิยมใช้ผสมกันเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล และลดต้นทุนการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นิยมใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มบรรจุอาหาร และอุตสากหรรมสิ่งทอ

เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกสังเคราะห์จากสารที่ผ่านกระบวนการทางปิโตรเคมี ปัจจุบันจึงมีการการพัฒนาสูตรสารประกอบพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจากวัตถุดิบชีวมวล เช่น แป้งมันสำปะหลัง เพื่อลดต้นทุนการใช้เม็ดพลาสติกลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูป และการย่อยสลายทางชีวภาพเมื่อผ่านการใช้งานแล้ว การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มจากพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกิดจากกระบวนการหลอมอัดรีด (Extrusion) โดยจะป้อนเม็ดพลาสติกเข้าส่วนป้อน (Hopper) จากนั้นเม็ดพลาสติกจะถูกลำเลียงไปด้านหน้า เมื่อได้รับความร้อน แรงเฉือน และความดัน จะทำให้พอลิเมอร์หลอมและไหลไปด้านหน้าเพื่อดันออกสู่แม่พิมพ์ (Die) ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน หรือการใช้เครื่องหลอมอัดรีดที่มีหน้าแม่พิมพ์แบบแผ่น (Flat die) ที่ต่อกับลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll) เพื่อทำให้แผ่นฟิล์มคงรูปร่างที่ต้องการ และม้วนเก็บในลักษณะของม้วนฟิล์ม ซึ่งลักษณะของฟิล์มขึ้นอยู่กับรูปร่างของแม่พิมพ์ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มที่ผลิตจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) สมบัติที่โดดเด่นของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต คือ สามารถย่อยสลายได้เองทั้งหมดทางชีวภาพ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม มีความยืดหยุ่นสูง และเกิดผลึกในกระบวนการผลิตได้ดี ทำให้ได้ค่าผลผลิตที่ได้ (%Yield) ในการผลิตที่สูง มีสมบัติทั่วไปคล้ายพอลิเอทิลีน แต่มีราคาที่สูงกว่า ทำให้ถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์มีต้นทุนที่สูงกว่าถ้วยกระดาษทั่วไป แต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีวัตถุดิบที่เพียงพอต่อการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพต่าง ๆ เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พอลิแลคติกแอซิด เป็นต้น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป และมีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงกว่าพลาสติกชีวภาพชนิดอื่น ๆ จึงประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน เช่น ด้านการเกษตร ด้านบรรจุภัณฑ์อาหารและฟิล์มต่าง ๆ อุปกรณ์และชิ้นส่วนรถยนต์ ถุงเพาะชำ พลาสติกคลุมหน้าดิน ซึ่งสามารถย่อยสลายได้เองเมื่อฝังกลบลงดิน เพื่อทดแทนการใช้อุปกรณ์เหล่านี้ที่ผลิตจากพลาสติกปิโตรเคมี ทำให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน ช่วยประหยัดเวลา แรงงาน และลดอัตราการตายของต้นกล้าได้อีกด้วย

สำหรับการย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะเกิดผ่านกระบวนการสลายตัวด้วยน้ำ (Hydro - biodegradable) โดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตรงบริเวณพันธะเอสเทอร์ ทำให้สายโซ่สั้นลง จากนั้นจะย่อยสลายต่อโดยใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ [9]

2.1.1.3 หมึกพิมพ์

ในการพิมพ์ตราสัญลักษณ์ (Logo) หรือลวดลายต่าง ๆ ลงบนถ้วยกระดาษ เพื่อให้เกิดความสวยงามหรือแสดง Branding นั้น ถ้วยกระดาษทั่วไปมักใช้หมึกพิมพ์ที่เป็นสารเคมีจากน้ำมันปิโตรเลียม โดยมีอยู่ด้วยกัน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแอโรแมติก (Aromatic) และกลุ่มแอลิแฟติก (Aliphatic) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds : VOCs) มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ ใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทางเคมี อาทิ ยาฆ่าแมลง สีทาบ้าน ทินเนอร์ เป็นต้น [21]

สำหรับการพิมพ์บนถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์จะใช้หมึกพิมพ์ถั่วเหลือง (Soy Ink) ซึ่งผลิตมาจากถั่วเหลือง โดยการสกัดให้เกิดความบริสุทธิ์ แทนการใช้น้ำมันปิโตรเลียม แล้วนำไปผสมกับสารสี (Pigment) เรซิน (Resin) และสารเติมแต่ง (Additive) ต่าง ๆ

คุณสมบัติเด่นของหมึกพิมพ์ถั่วเหลือง คือ สามารถย่อยสลายได้ง่าย ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยให้สารสีทำงานได้ดี มีสีสันสดใส คมชัด และความเข้มสูง ส่งผลให้สามารถใช้ปริมาณหมึกพิมพ์น้อยลง แต่ยังให้ประสิทธิภาพเหมือนเดิม เป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตหมึกพิมพ์ [11]

หมึกพิมพ์ถั่วเหลืองมีผิวที่มันเงา มีความต้านทานการเสียดสีที่ดี ยืดอายุการใช้งานของเครื่องพิมพ์ วัตถุดิบสามารถหาได้ง่าย เนื่องจากเป็นถั่วเหลืองที่ใช้ในการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองธรรมดา ทำให้ต้นทุนการผลิตน้อยกว่าหมึกพิมพ์โดยทั่วไป ไม่มีสาร VOCs ที่ส่งกลิ่นเหม็นและทำให้เกิดมลพิษในอากาศ ซึ่งหากสูดดมเข้าไปจะก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ สามารถพิมพ์ลงบนบรรจุภัณฑ์และสัมผัสกับอาหารและเครื่องดื่ม กำจัดออกจากกระดาษได้หมดและง่ายกว่าหมึกพิมพ์ทั่วไป ทำให้สามารถนำกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ดังกล่าวมาใช้ได้ใหม่ และมีความทนทาน เนื่องจากเยื่อกระดาษถูกทำลายน้อยในระหว่างการรีไซเคิล

ข้อเสียของหมึกพิมพ์ถั่วเหลือง คือ ไม่สามารถใช้งานได้ทุกประเภท เช่น หมึกปากกาลูกลื่น เป็นต้น แห้งตัวได้ช้ากว่าหมึกพิมพ์ฐานน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากไม่มีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในองค์ประกอบ ทำให้เกิดปัญหาสำหรับงานพิมพ์ประเภทงานพิมพ์บนกระดาษเคลือบผิว [2]

2.1.2 สมบัติของถ้วยกระดาษ

ถ้วยกระดาษโดยทั่วไป สามารถทนความร้อน มีสภาพการใช้งานที่คงทน ไม่ยุ่ยหรือเปื่อยง่าย ถูกซีล (Seal) เพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยคุณภาพของถ้วยกระดาษจะแตกต่างกัน เนื่องจากโรงงานผลิตแต่ละแห่งเลือกใช้กระดาษที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน ไปจนถึงขั้นตอน กระบวนการ ประสบการณ์ และเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต ซึ่งถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ถูกผลิตและทดสอบมาให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ้วยกระดาษทั่วไป แต่มีคุณสมบัติบางประการที่พิเศษกว่า คือ กระดาษและองค์ประกอบอื่น ๆ ภายในถ้วยกระดาษสามารถย่อยสลายได้

เองภายในเวลา 4 – 6 เดือน แต่ถ้วยกระดาษทั่วไป ใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าหลายเท่า และเมื่อย่อยสลายแล้วอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ถ้วยกระดาษ จุฬาซีโรเวสต์สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด ไม่มีสารตกค้างใด ๆ ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [7]

2.2 การรีไซเคิล

ขยะรีไซเคิล หมายถึง ขยะ หรือวัสดุเหลือใช้ ที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ โดยการนำมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต เช่น กระดาษ แก้ว และเศษพลาสติก เป็นต้น

ซึ่งขยะพวกนี้จะมีการจัดการที่แตกต่างกัน โดยสามารถแยกประเภทได้ ดังนี้

1.) ประเภทกระดาษ

2.) ประเภทพลาสติก

3.) ประเภทแก้ว

4.) ประเภทโลหะ

5.) ประเภทขยะอะลูมิเนียม

การรีไซเคิล เป็นการจัดการวัสดุเหลือใช้ที่กำลังจะกลายเป็นขยะ โดยการนำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพ เพื่อให้ได้เป็นวัสดุใหม่ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก โดยวัสดุที่ผ่านการแปรสภาพนั้น อาจจะเป็นผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ก็ได้

2.2.1 การรีไซเคิลกระดาษ

ขยะจากบ้านเรือน จะมีขยะจากกระดาษเป็นองค์ประกอบสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นถุงกระดาษ ลังกระดาษ หรือหนังสือพิมพ์ กระดาษเหล่านี้ส่วนใหญ่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ยกเว้นกระดาษบางประเภท เช่น กระดาษเมทัลไลซ์ (metallized paper) เนื่องจากกระดาษประเภทนี้มีเซลลูโลสในปริมาณที่น้อย และมีอลูมิเนียมปนเปื้อนอยู่ ทำให้ไม่เหมาะแก่การนำมารีไซเคิลอีก

ในการรีไซเคิลกระดาษ ขยะกระดาษจะถูกส่งไปยังโรงงานกระดาษเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบผสมในการผลิตกระดาษประเภทต่าง ๆ ซึ่งกระดาษนั้นมีหลากหลายชนิดและหลากหลายคุณภาพ โดยกระดาษขาวสำหรับเขียนจะเป็นกระดาษที่มีคุณภาพสูง จะถูกนำมาแปรรูปเป็นกระดาษสมุดและหนังสือ ส่วนกระดาษหนังสือพิมพ์และกระดาษกล่องจะมีคุณภาพต่ำ และถูกนำมาแปรรูปเป็นกระดาษสำหรับบรรจุเครื่องดื่ม กระดาษห่อของขวัญ และกล่องกระดาษแข็ง เป็นต้น [1]

เยื่อเวียนทำใหม่ (Recycled Pulp) ทำขึ้นจากกระดาษที่ใช้แล้ว นำมาผ่าน ขั้นตอนการตีกระจายและทำความสะอาดเยื่อ โดยอาจมีการกำจัดหมึกออกเพื่อเพิ่มความขาวสว่าง สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต

กระดาษ เช่น กระดาษทิชชู กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษคราฟต์ กระดาษลูกฟูก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เยื่อเวียนทำใหม่มักมีความแข็งแรงและความขาวสว่างที่ต่ำกว่าเยื่อบริสุทธิ์ (virgin pulp) ซึ่งผลิตโดยตรงจากไม้

2.2.2 การรีไซเคิลพลาสติก

พลาสติก ที่ใช้กันในปัจจุบัน เกิดจากการกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ เพื่อแยกเอาสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และผ่านกระบวนการแยกสลายอีกหลายขั้น จนได้เป็นสารประกอบขนาดเล็ก ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติกชนิดต่าง ๆ

ด้วยคุณสมบัติที่เหมาะสมของพลาสติกซึ่งมีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม มีความทนทาน สีสันสวยงาม และมีหลายประเภท ทำให้พลาสติกเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งขยะพวกนี้เมื่อนำมาเผาก็จะทำให้เกิดมลพิษสิ่งแวดล้อม หรือหากนำไปฝังกลบ ก็จะทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการฝังกลบ หนึ่งในวิธีการที่ดีและเหมาะสมสำหรับการกำจัดขยะพลาสติก ก็คือ การนำกลับมารีไซเคิล โดยพลาสติกสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้เกือบทุกประเภท ส่วนพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ได้แก่ พลาสติกชนิดยูเรีย (Urea) เมลามีน (Melamine) และอีพอกซี่ (Epoxy)

พลาสติกที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ มีดังนี้

1.) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) เป็นพลาสติกที่ทนต่อสารเคมี ความร้อน ทนต่อแรงกระแทก นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น ชาม กล่อง ถ้วยนมเปรี้ยว และกระป๋องมันฝรั่งทอด เป็นต้น

2.) พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) เป็นพลาสติกที่แข็ง ใส แต่เปราะและแตกง่าย ราคาถูก นิยมนำมาทำเป็นภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุ

3.) พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) มีความยืดหยุ่น ไม่เปราะแตกง่าย นิยมนำมาทำขวดเครื่องดื่มหรือขวดน้ำมันพืช

4.) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride : PVC) เป็นพลาสติกแข็ง ใช้ทำท่อ แต่สามารถทำให้นิ่มโดยใส่สารพลาสติกไซเซอร์ ใช้ทำแผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ขวดแชมพูสระผม

5.) พลาสติกอื่น ๆ เช่น พลาสติกผสม นิยมนำมาทำบรรจุภัณฑ์ที่มีสีดำ เช่น กะละมัง

ในกระบวนการรีไซเคิล ขั้นแรกต้องทำการแยกประเภทพลาสติกก่อน เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีลักษณะพิเศษ คือ มีน้ำหนักและความซับซ้อนทางโครงสร้างโมเลกุลสูง ทำให้พลาสติกแต่ละชนิดไม่สามารถผสมเข้าด้วยกันได้เหมือนสสารชนิดอื่น เช่น แก้วหรือโลหะ

หลังจากผ่านกระบวนการแยกประเภทพลาสติกแล้ว ขยะพลาสติกจะถูกส่งเข้าโรงงานรีไซเคิล โดยกระบวนการรีไซเคิลนั้นสามารถแยกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1.) กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal depolymerization)

เป็นกระบวนการแปรรูปขยะพลาสติกกลับสู่รูปของน้ำมันปิโตรเลียมโดยการใช้ความร้อน มีข้อดีคือสามารถรีไซเคิลพลาสติกทุกชนิดได้ แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างระบบที่สูง

2.) กระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน (Heat compression)

เป็นกระบวนการแปรรูปขยะให้กลับสู่สถานะวัตถุดิบตั้งต้น โดยเริ่มจากการทำความสะอาด อบแห้ง บดหลอม และแปรรูปพลาสติกกลับสู่รูปแบบเม็ดพลาสติก สามารถแปรรูปได้เฉพาะพลาสติกที่ไม่ทนความร้อน (เช่น PET, PE และพลาสติกชนิดอื่น ๆ ที่หลอมตัวได้) มีข้อเสียที่มีต้นทุนพลังงานที่ใช้ในกระบวนการที่สูง

3.) กระบวนการอื่น ๆ

กระบวนการนี้จะใช้กรรมวิธีอื่น ๆ ไม่เข้าพวกกับ 2 วิธีแรก เช่น บดและอัดขยะพลาสติกให้กลายเป็นแผ่นปูทางเท้า หรือนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น [5]

2.3 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพ ตามคำจำกัดความของสมาคมพลาสติกชีวภาพแห่งสหภาพยุโรป (European Bioplastics, EuBP) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ความหมาย ได้แก่

2.3.1 พลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable plastics) คือ พลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดทั้งจากวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ (Bio - based materials / Renewable) หรือจากปิโตรเคมี (Petro - based materials / Non - Renewable) ที่เมื่อผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพ (Composting) หลังการใช้งานจะสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Degradable) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ และต้องไม่ทิ้งสิ่งที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สิ่งแปลกปลอม หรือสารพิษไว้ตามที่ระบุไว้ตามมาตรฐานการทดสอบ ดังนี้ สหภาพยุโรป : EN 13432 / สหรัฐอเมริกา : ASTM D-6400 / ไทย : มอก. 17088 / ระดับนานาชาติ ISO 17088: 2008 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการรับรองจะได้รับตราสัญลักษณ์ตามมาตรฐานที่ได้ ตัวอย่างของพลาสติกชีวภาพที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ เช่น พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch based plastics) พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid : PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate : PHAs), พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate : PBS) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท โค เทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate-co-Teraphthelate : PBAT)

2.3.2 พลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ (Bio-based plastics) คือ พลาสติกที่ผลิตมาจากแหล่งวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ โดยใช้แหล่งคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุลของแป้ง น้ำตาล น้ำมันพืช หรือเซลลูโลส โดยมีพืชที่นำมาใช้ผลิต ได้แก่ ข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าวสาลี อ้อย และไม้ โดยสัดส่วนของแหล่งคาร์บอนในผลิตภัณฑ์จะใช้วิธีการตรวจสอบวัดตามมาตรฐานของ ASTM D-

6866 โดยพลาสติกในกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติทั้งสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Degradable) หรือไม่สลายตัวได้ทางชีวภาพ (Non - Degradable) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในกลุ่มพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ เช่น พลาสติกกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่ใช้วัตถุดิบจากโพรเพนไดออลที่มาจากพืช (Bio – Propanedial : PDO) ได้แก่ Bio - PET, พลาสติกกลุ่มไนลอนที่ผลิตมาจากน้ำมันเมล็ดละหุ่ง (Bio - PA11), พลาสติกกลุ่มพอลิเอทิลีนจากเอทานอลที่ผลิตมาจากอ้อย (Bio - PE)

พลาสติกย่อยสลายได้ ขั้นตอนสุดท้ายจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์จนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ 50 – 60% อุณหภูมิ 50 – 60 องศาเซลเซียส และจุลินทรีย์ในธรรมชาติ หรือนำไปผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพภายในระยะเวลาไม่เกิน 180 วัน ผลที่ได้จะไม่มีส่วนของพลาสติก และสารพิษหลงเหลืออยู่เลย [22]

2.4 การผลิตเยื่อกระดาษ [4]

2.4.1 การตีเยื่อ (Beating)

เป็นการใช้แรงกลเพื่อปรับสภาพผนังของเส้นใยให้เหมาะกับการผลิตกระดาษ โดยจะเพิ่มการบวมน้ำของเส้นใย เพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใย และทำให้เส้นใยอ่อนตัวลง ซึ่งเป็นการเพิ่มพันธะของเส้นใย ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงขึ้น

เมื่อเยื่อผ่านการตี ผนังของเส้นใยจะฉีกขาด เส้นใยดูดซึมน้ำได้มากขึ้น เส้นใยบวม (Swell) ได้ง่าย เนื่องจากชั้นผนังปฐมภูมิ (Primary Wall) ฉีกขาด ดังนั้นชั้นผนังทุติยภูมิ (Secondary Wall) ที่ดูดน้ำเข้าไป จึงขยายตัวออกด้านข้างอย่างเต็มที่ เส้นใยมีความยืดหยุ่นและสามารถแนบตัวกับเส้นใยรอบข้างได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างเส้นใย นอกจากนี้การแตกแขนงของผนังเส้นใย (Fibrillation) ยังทำให้พื้นที่ผิวของเส้นใยแต่ละเส้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พันธะระหว่างเส้นใยมีมากขึ้น นอกจากนั้นยังทำให้เส้นใยสั้นลง ข้อดีคือ ทำให้การกระจายตัวของเส้นใยในแผ่นกระดาษ (Formation) ดีขึ้น แต่ความแข็งแรงของเส้นใยจะลดลงไปด้วย โดยปัจจัยสำคัญคือความเข้มข้นของน้ำเยื่อขณะทำการตีเยื่อ

- ถ้าใช้ความเข้มข้นของน้ำเยื่อน้อย เส้นใยจะถูก Refiner ตัดให้สั้นได้ง่าย
- ถ้าใช้ความเข้มข้นของน้ำเยื่อมาก เส้นใยจะไม่ค่อยถูกตัด

2.4.2 การแยกเยื่อและสิ่งปลอมปนออกจากกัน

เพื่อให้ได้เยื่อกระดาษที่บริสุทธิ์จึงต้องทำการกำจัดสิ่งปลอมปนโดยใช้ตะแกรง (Screen) ด้วยการนำน้ำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายไปร่อนผ่านตะแกรงขนาดใหญ่ (ชั้นบน) และตะแกรงขนาดเล็ก (ชั้นล่าง) ที่วางซ้อนกัน โดย

เยื่อกระดาษจะผ่านตะแกรงขนาดใหญ่แต่ไม่ผ่านตะแกรงขนาดเล็ก เราจึงสามารถกำจัดสิ่งปลอมปนที่มีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถลอดผ่านรูของตะแกรงขนาดใหญ่ลงมาออกไปได้

2.4.3 การเตรียมน้ำเยื่อ

ก่อนที่เยื่อกระดาษจะเข้าสู่กระบวนการนำไปทำเป็นแผ่นกระดาษ จะต้องมีการเตรียมน้ำเยื่อก่อน ซึ่งทำได้โดยการนำเยื่อกระดาษไปบดหรือกระจาย เพื่อพัฒนาศักยภาพของเส้นใยให้ยึดเกาะกันได้ดีขึ้น จากนั้นอาจมีการผสมหรือใส่สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งอาจมีการนำเยื่อมากกว่า 1 ชนิดมาผสมกันเพื่อลดต้นทุนและเพื่อให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน โดยส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า “น้ำเยื่อ (Stock)”

2.5 การขึ้นรูปแผ่นกระดาษ [13]

หลังจากเตรียมน้ำเยื่อแล้ว น้ำเยื่อจะถูกส่งเข้าเครื่องจักรผลิตกระดาษเพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาว และต่อเนื่องกัน เรียกว่า “เว็บเปเปอร์ (Web paper)” เครื่องจักรที่ใช้ผลิตกระดาษมีหลายแบบ ส่วนใหญ่เป็นแบบโฟร์ดริเนียร์ (Fourdrinier) และแบบไซลินเดอร์ (Cylinder)

โดยเครื่องจักรผลิตกระดาษทุกแบบจะมีส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อทำหน้าที่หลัก 3 ประการ คือ

2.5.1 การแยกน้ำออก (Draining) ทำหน้าที่เป็นตะแกรงรองรับน้ำเยื่อ น้ำจะลอดผ่านตะแกรงทำให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นเปียก (Wet sheet forming)

2.5.2 การกดน้ำออก (Pressing) ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียก ทำให้เส้นใยภายในกระดาษเกิดการยึดติดกันแน่น

2.5.3 การอบกระดาษ (Drying) แผ่นกระดาษจะถูกอบให้แห้งเพื่อไล่น้ำออกจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 4 – 5

2.6 สมบัติกระดาษ [8]

2.6.1 น้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight)

น้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight) คือ น้ำหนักของกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งวัดจากกระดาษที่ถูกเก็บไว้ในภาวะที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมตามที่มาตรฐานกำหนด โดยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษในระบบน้ำหนักมาตรฐานแบบเมตริก (Metric basis weight system) อันเป็นระบบที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยนั้น น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษจะวัดเป็นกรัมต่อตารางเมตร (g/m^2) หรือเรียกอีกแบบว่า “แกรมเมจ (Grammage)” สามารถเรียกสั้น ๆ ว่า “แกรม”

2.6.2 ความหนา (Thickness)

ความหนาของกระดาษ (Thickness) คือ ระยะห่างของผิวกระดาษทั้งสองด้าน โดยวัดในแนวตั้งฉากกับผิวกระดาษ ภายใต้ภาวะการทดสอบที่กำหนดเอาไว้เป็นมาตรฐานเพื่อให้เกิดความผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด มีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร (mm) ไมโครเมตร (μm) หรือนิ้ว (inch) ซึ่งความหนาของกระดาษจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ ชนิดของเยื่อกระดาษที่นำมาผลิต กรรมวิธีในการบดเยื่อกระดาษ และแรงกดของลูกกลิ้งในขั้นตอนการรีดกระดาษ ดังนั้นแม้ว่ากระดาษจะมีน้ำหนักพื้นฐานที่เท่ากัน ก็อาจมีความหนาที่ไม่เท่ากันได้

2.6.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของกระดาษ (Density) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ การทราบความหนาแน่นของกระดาษจะทำให้การเปรียบเทียบกระดาษแต่ละแผ่นมีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากกระดาษที่มีน้ำหนักไม่เท่ากันอาจมีความหนาต่างกันได้ ซึ่งความหนาแน่นที่แตกต่างกันของกระดาษแต่ละชนิด / แผ่น จะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษโดยตรง

2.6.4 ความพรุน (Porosity)

กระดาษโดยทั่วไปจะมีอากาศอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยปริมาตร อากาศบางส่วนอยู่ภายในเส้นใย แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างเส้นใย (รูพรุนในเนื้อกระดาษ) อัตราส่วนของปริมาตรรูพรุนต่อปริมาตรทั้งหมดของแผ่นกระดาษนั้น เรียกว่า ความพรุนของกระดาษ

วิธีวัดความพรุนของกระดาษโดยตรงทำได้ค่อนข้างยาก โดยทั่วไปจึงใช้วัดเทียบกับความสามารถในการต้านอากาศ ซึ่งความพรุนของกระดาษแสดงถึงความต้านทานอากาศที่ผ่านได้ด้วย ถ้ากระดาษมีความพรุนมาก ความสามารถในการต้านอากาศก็จะต่ำ และความพรุนยังเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับของเหลวได้อีกด้วย ดังนั้นความพรุนจึงมีความสำคัญในการนำกระดาษไปพิมพ์หรือเคลือบผิว [12]

2.6.5 ความเรียบ (Smoothness)

ความเรียบของผิวกระดาษ (Smoothness) เป็นลักษณะของผิวกระดาษที่สัมพันธ์กับความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบ ได้แก่ ลักษณะเส้นใย ฟิลเลอร์ (Filler) ชนิดของตะแกรงและสักหลาด ปริมาณการรีดน้ำและขัดผิว ผิวหน้าของลูกโมอบแห้ง และการเคลือบผิว

Air flow เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดการไหลผ่านของอากาศระหว่างผิวกระดาษกับหัววัดที่นิยมใช้มากที่สุด ถ้ากระดาษเรียบ อากาศ (ลม) จะไหลผ่านได้ยาก เนื่องจากผิวกระดาษจะแนบไปกับหัววัด แต่ถ้ากระดาษหยาบอากาศก็จะไหลผ่านได้ง่าย [14]

2.6.5 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) คือ แรงดึงสูงสุดต่อหน่วยความกว้างที่กระดาษสามารถต้านทานได้ก่อนที่จะขาด ภายใต้ภาวะการทดสอบที่กำหนด โดยจะรายงานในหน่วย กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m)

ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) คือ อัตราส่วนของความแข็งแรงต่อแรงดึง (หน่วยนิวตันต่อเมตร : N/m) ต่อน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (หน่วยกรัมต่อตารางเมตร : g/m^2)

2.6.6 ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)

ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance) หรือ ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear strength) คือ ความสามารถของกระดาษในการต้านแรงกระทำซึ่งจะทำให้กระดาษขาดออกจากรอยฉีกเดิม หรือค่าแรงที่วัดได้จากเครื่องเมื่อใช้ Pendulum ในการฉีกกระดาษ รายงานในหน่วยมิลลินิวตัน (mN) หรือกรัม (gram)

2.6.7 ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength)

ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength) คือ ความสามารถของกระดาษในการต้านแรงดันที่กระทำบนแผ่นกระดาษด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนทำให้กระดาษทะลุภายใต้ภาวะที่กำหนด มีหน่วยเป็นกิโลปาสคาล (kPa) หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) โดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานแรงดันทะลุจะขึ้นอยู่กับชนิดสัดส่วน การเตรียมเส้นใย และปริมาณเส้นใย รวมทั้งสารอื่น ๆ ในกระดาษ [18]

2.6.8 การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำ คือ ความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษในพื้นที่หนึ่งตารางเมตรภายในระยะเวลาที่กำหนด รายงานในหน่วยกรัมต่อตารางเมตร (g/m^2) ซึ่งความสามารถในการดูดซึมน้ำจะมีผลต่อความแข็งแรงของกระดาษด้วย [16]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1.1 ถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ (ขนาด 22 ออนซ์) ที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS)

3.1.1.2 กระดาษสำหรับผลิตถ้วยกระดาษชนิดเคลือบพอลิเอทิลีน (PE) โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทย เคเค อุตสาหกรรม จำกัด

3.1.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการปรับค่า pH ของเยื่อให้เป็นด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดห้องปฏิบัติการ

3.1.2 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องบดเยื่อ (Valley beater) รุ่น UEC-2018A, Universal Engineering Corporarion, India

3.1.2.2 เครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrator) รุ่น Formax T-100, Adirondack Machine Corporation, USA

3.1.2.3 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former) Rapid-Kothen sheet former, RK-2A KWT, Paper Testing Instrument (PTI), Austria

3.1.2.4 เครื่องวัดความชื้น (Moisture determination balance) รุ่น FD-600, Kett Electric Laboratory, USA

3.1.2.5 เครื่องวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber Quality Analyzer) Optest, Canada

3.1.2.6 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (Thickness tester) Frank, Germany

3.1.2.7 เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester) DIGI-Bekk smoothness tester, TOYOSEIKI, Japan

3.1.2.8 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester) Strograph Model E-S, TOYOSEIKI, Japan

3.1.2.9 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Tear tester) Protear, Thwing-Albert Instrument, USA

3.1.2.10 เครื่องวัดความพรุน (Porosity tester) TOYOSEIKI, Japan

3.1.2.11 อุปกรณ์ทดสอบการซึมน้ำ (Cobb sizing tester) Regmed, Brazil

3.1.2.12 ตะแกรงร่อนเยื่อขนาดใหญ่ (ขนาด 10 mesh) และขนาดเล็ก (ขนาด 200 mesh)

3.1.2.13 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH meter)

3.1.2.14 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

3.1.2.15 ตู้อบ Venticell, Germany

3.1.2.16 ตู้สำหรับแช่เยื่อกระดาษที่บดเสร็จแล้ว

3.1.2.17 ถุงซิปล็อก

3.1.2.18 บีกเกอร์

3.1.2.19 แท่งแก้ว

3.1.2.20 กระชอนสแตนเลส

3.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการตีกระจายถ้วยกระดาษทั้ง 2 ชนิด ตอนที่ 2 การคัดเลือกภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 1 เพื่อนำมาทำการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย ขึ้นแผ่นกระดาษ และทดสอบสมบัติกระดาษ และตอนที่ 3 การทดลองผลิตเยื่อขึ้นรูป

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1 หาภาวะที่เหมาะสมในการตีกระจายเยื่อจากถ้วยกระดาษ

นำกระดาษที่ใช้ในการผลิตถ้วยกระดาษทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ กระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) จากผู้ผลิตเดียวกัน มาตัดให้ได้ขนาด 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร และแช่น้ำเป็นเวลา ชั่วโมง โดยน้ำหนักกระดาษและน้ำที่ใช้จะคำนวณจากความชื้นของกระดาษ (วิธีคำนวณดังภาคผนวก ข)

นำกระดาษที่แช่น้ำไว้ไปตีกระจายในเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) โดยแบ่งเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อเป็น 30 นาที และ 60 นาที โดยก่อนจะทำการตีกระจายจะแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน แล้วทำการปรับค่า pH ของน้ำเยื่อ ดังนี้

ส่วนที่ 1 สำหรับการทดสอบในภาวะที่เป็นกลาง จะไม่มีการเติมสารเคมีใด ๆ ลงไป

ส่วนที่ 2 สำหรับการทดสอบในภาวะที่เป็นด่าง โดยจะเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป เพื่อปรับค่า pH ของน้ำเยื่อให้ได้เท่ากับ 10

โดยรวมแล้ว จะได้เยื่อจากการตีกระจายเยื่อทั้งหมด 4 ภาวะที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดกระดาษ เมื่อได้เยื่อที่ผ่านการตีกระจายออกมาแล้ว นำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาดใหญ่ (ขนาด 10 mesh) และขนาดเล็ก (ขนาด 200 mesh) เพื่อคัดแยกเยื่อที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาดใหญ่ ซึ่งอาจยังมีการจับตัวเป็นก้อน รวมถึงพลาสติกไว้ นำไปอบในตู้อบให้แห้ง และนำมาชั่งน้ำหนัก และนำเยื่อที่ยังค้างอยู่บนตะแกรงขนาดเล็ก (ขนาด 200 mesh) ไปคำนวณหาผลผลิตที่ได้ (%Yield) จากนั้นเก็บเยื่อในถุงซิปล็อกและนำไปแช่ในตู้แช่เพื่อเป็นการรักษาสภาพของเยื่อไว้

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2 คัดเลือกภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 1 เพื่อนำมาทำการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย ขึ้นแผ่นกระดาษ และทดสอบสมบัติกระดาษ

หาภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากผลผลิตที่ได้ (%Yield) หรือเยื่อที่ได้จากการตีกระจายแล้ว สำหรับทำการทดลองในขั้นต่อ ๆ ไป

3.2.2.1 การวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ในขั้นตอนนี้จะนำเยื่อที่เตรียมได้จาก ภาวะที่ได้ทำการเลือกไว้ไปทำการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยเครื่อง Fiber Quality Analyzer

3.2.2.2 การขึ้นแผ่นกระดาษ

นำเยื่อที่เตรียมได้จาก ภาวะที่ได้ทำการเลือกไว้ มาปั่นรวมกับน้ำในเครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrator) เพื่อเป็นการกระจายน้ำเยื่อ และปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้เป็น 0.5 % และนำไปขึ้น

แผ่นกระดาษด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former) แบบ ISO Handsheets โดยจะขึ้นแผ่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร หลังจากออกมาเป็นแผ่นกระดาษแล้ว นำไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

3.2.2.3 การทดสอบสมบัติของกระดาษ

นำแผ่นกระดาษที่ได้ไปทดสอบสมบัติ ได้แก่ ความหนา (Thickness) ความต้านทานอากาศ (Air resistance) ความเรียบ (Smoothness) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance) ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting strength) และสมบัติการซึมน้ำโดยวิธี Cobb test

3.2.3 การทดลองตอนที่ 3

นำเยื่อที่ได้จากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) ซึ่งใช้เวลาในการตีกระจาย 30 นาทีเท่ากัน มาทดลองผลิตเยื่อขึ้นรูปด้วยการนำกระชอนสแตนเลสประกบไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างของเยื่อกระดาษ และนำไปเข้าตู้อบเพื่ออบเยื่อให้แห้ง เมื่อเยื่อแห้งและคงรูปเป็นลักษณะคล้ายถ้วยแล้ว นำมาเปรียบเทียบกัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

นิยามศัพท์ที่ใช้ในการบันทึกผลการทดลอง

PBS หมายถึง กระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS)

PE หมายถึง กระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE)

ตัวเลข 30 และ 60 หมายถึง เวลาที่ใช้ในการตีกระจาย 30 และ 60 นาที

NaOH หมายถึง มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับภาวะให้เป็นด่าง

4.1 ผลการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการตีกระจายถ้วยกระดาษ

เป็นการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการนำกระดาษจากถ้วยกระดาษทั้ง 2 ชนิด มาตีกระจายในภาวะที่แตกต่างกัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 เปรียบเทียบผลผลิตที่ได้จากการตีกระจายเยื่อจากถ้วยกระดาษทั้ง 2 ชนิด ในภาวะที่แตกต่างกัน

ครั้งที่	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	Reject [%]	Yield [%]	Loss [%]
1	PBS30	20.90	71.96	7.14
2	PBS60	19.55	69.73	10.72
3	PBS30NaOH	19.05	67.11	13.84
4	PBS60NaOH	21.50	70.78	7.72
5	PE30	16.00	85.66	-1.66
6	PE60	13.31	90.56	-3.86
7	PE30NaOH	13.45	88.70	-2.15
8	PE60NaOH	14.55	86.60	-1.15

จากการผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1 พบว่า เมื่อกำหนดให้ปริมาณของวัตถุดิบตั้งต้นในการทดลองเป็น 100% เท่ากัน พิจารณาปริมาณของเยื่อและสารเคลือบที่ไม่ผ่านรูตะแกรงขนาดใหญ่ (Reject) พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) มีปริมาณของเยื่อและสารเคลือบหลงเหลืออยู่มากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) แสดงว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตนั้น เมื่อผ่านการตีกระจายแล้ว สามารถแยกสารเคลือบออกมาจากกระดาษได้ง่ายกว่า

เมื่อพิจารณาน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือผลผลิตที่ได้ (%Yield) จากทั้ง 8 ภาวะ จะเห็นว่ามีความแตกต่างระหว่างกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) โดยกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) ให้ผลผลิตที่มากกว่า แต่พบว่าภาวะในการตีกระจาย ทั้งในด้านระยะเวลาและค่า pH ไม่ได้ส่งผลแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกเพียง 2 ภาวะ ได้แก่ ภาวะที่มีความรุนแรงต่ำที่สุด (ใช้เวลาในการตีกระจาย 30 นาทีที่ภาวะเป็นกลาง) และภาวะที่มีความรุนแรงสูงที่สุด (ใช้เวลาในการตีกระจาย 60 นาที ที่ภาวะด่าง) ของกระดาษทั้ง 2 ชนิด มาใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ และทดสอบในขั้นตอนต่อ ๆ ไป

4.2 ผลการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย การขึ้นแผ่นกระดาษ และทดสอบสมบัติกระดาษ

4.2.1 ผลการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย

เป็นผลจากการนำเยื่อที่ตีกระจายในภาวะทั้ง 2 ภาวะ ที่คัดเลือกมาของกระดาษทั้ง 2 ชนิด ไปทำการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยเครื่อง Fiber Quality Analizer ดังแสดงผลในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	PBS30	PBS60NaOH	PE30	PE60NaOH
ความยาวเส้นใย (LWW) [mm]	1.300 ± 0.045	1.364 ± 0.088	0.841 ± 0.039	0.886 ± 0.004
ความกว้างเส้นใย [µm]	24.267 ± 0.094	24.467 ± 0.047	20.833 ± 0.047	20.900 ± 0.082
เส้นใยขนาดเล็ก [%]	18.110 ± 0.543	18.305 ± 0.611	17.432 ± 0.258	17.767 ± 0.183
ความงอเฉลี่ย	0.102 ± 0.001	0.103 ± 0.001	0.135 ± 0.001	0.130 ± 0.004
ดัชนีเส้นใยหักงอ	1.263 ± 0.027	1.265 ± 0.010	1.960 ± 0.029	1.917 ± 0.035
จำนวนเส้นใยที่เป็นกระจุก	82 ± 7.48	84 ± 7.79	21 ± 2.36	22 ± 1.25

จากตารางจะพบว่าเส้นใยของเยื่อที่ได้จากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะมีความยาวเฉลี่ยและความกว้างมากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน แสดงว่าเส้นใยที่ได้จากกระดาษชนิดนี้มีความสมบูรณ์กว่า เพราะเมื่อผ่านการตีกระจายแล้วยังคงเป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ ความแข็งแรงของเส้นใหญ่เดี่ยว ๆ จึงน่าจะมากกว่า ส่วนเส้นใยของเยื่อที่ได้จากกระดาษที่ได้จากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนนั้น เมื่อถูกตีกระจายกลายเป็นเส้นใยที่สั้นและมีขนาดเล็กลงมาก ซึ่งผลก็เป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าความงอเฉลี่ยและดัชนีเส้นใยหักงอ ซึ่งพบว่าเส้นใยของเยื่อที่ได้จากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนมีความงอที่มากกว่า แสดงว่าเส้นใยนั้นไม่สมบูรณ์และน่าจะอ่อนแอกว่า ส่วนจำนวนเส้นใยที่เป็นกระจุกแสดงถึงเยื่อที่ตีกระจายได้ไม่สมบูรณ์ ในกรณีนี้กระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีจำนวนเส้นใยที่เป็นกระจุกมากกว่า อาจแสดงถึงความเหนียวของสารเคลือบที่ยึดเส้นใยเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้แยกออกจากกันยาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า %Reject ในตารางที่ 4-1 ที่พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีชิ้นของเยื่อและสารเคลือบขนาดใหญ่อยู่มากกว่า

เมื่อพิจารณาผลของการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับให้ภาวะเป็นด่างและเพิ่มระยะเวลาการตีเยื่อ พบว่าการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์และใช้เวลาในการตีกระจายมากขึ้น ทำให้ได้ช่วงขนาดของเส้นใยกว้างกว่า กล่าวคือ จะได้เส้นใยที่มีความยาวและความกว้างที่มากกว่า และในขณะเดียวกันก็ได้เส้นใยขนาดเล็กในปริมาณที่

มากกว่าเช่นกัน ซึ่งผลเป็นเหมือนกันในกระดาษทั้ง 2 ชนิด อาจเป็นเพราะในขั้นตอนการตีกระจาย การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ตีกระจายกระดาษออกมาได้มากกว่า

4.2.2 ผลการทดสอบการขึ้นแผ่นกระดาษ

หลังจากนำเยื่อที่ตีกระจายจากแต่ละภาวะไปขึ้นรูปแผ่นกระดาษแล้ว นำกระดาษไปชั่งน้ำหนัก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ ค-1 และคำนวณหาน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษแต่ละแผ่น ดังแสดงในตารางที่ ค-1

4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติกระดาษ

เป็นผลการทดสอบสมบัติของกระดาษทั้ง 2 ชนิดที่ได้จากการขึ้นแผ่นกระดาษจากเยื่อกระดาษทั้ง 2 ภาวะ โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมบัติทั้งหมด 7 อย่าง ได้แก่ ความหนา (Thickness) ความต้านทานอากาศ (Air resistance) ความเรียบ (Smoothness) ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting strength) และการซึมน้ำโดยวิธี Cobb test โดยใช้กระดาษที่ได้จากการขึ้นแผ่นในแต่ละภาวะ จำนวน 5 แผ่น มาทำการทดสอบ

4.2.3.1 ความหนา (Thickness)

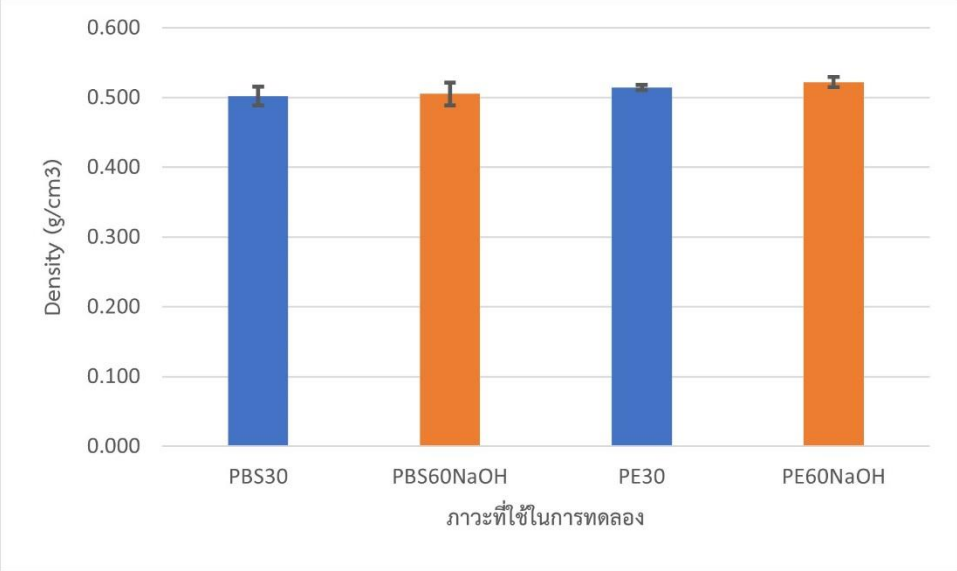
ตารางที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของความหนากระดาษ (Thickness)

ภาวะที่ใช้ในการตีกระจาย	ความหนากระดาษ [µm]
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	163.2 ± 5.9
PBS60NaOH	155.8 ± 6.3
PE30	152.8 ± 1.8
PE60NaOH	153.4 ± 1.8

เนื่องจากกระดาษแต่ละแผ่นมีน้ำหนักที่ต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อความหนาได้ จึงได้ทำการคำนวณหาความหนาแน่นกระดาษ (Density) เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปเปรียบเทียบแผ่นกระดาษ (วิธีคำนวณความหนาแน่นดังภาคผนวก ข และตารางแสดงผลการคำนวณความหนาแน่นของกระดาษทุกแผ่นดังภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของความหนาแน่นกระดาษ (Density)

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	**ความหนาแน่นกระดาษ [g/cm^3]**
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	0.502 ± 0.0136
PBS60NaOH	0.505 ± 0.0166
PE30	0.514 ± 0.0038
PE60NaOH	0.522 ± 0.0077



ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงค่าความหนาแน่น (Density) ของกระดาษทั้ง 2 ภาวะ

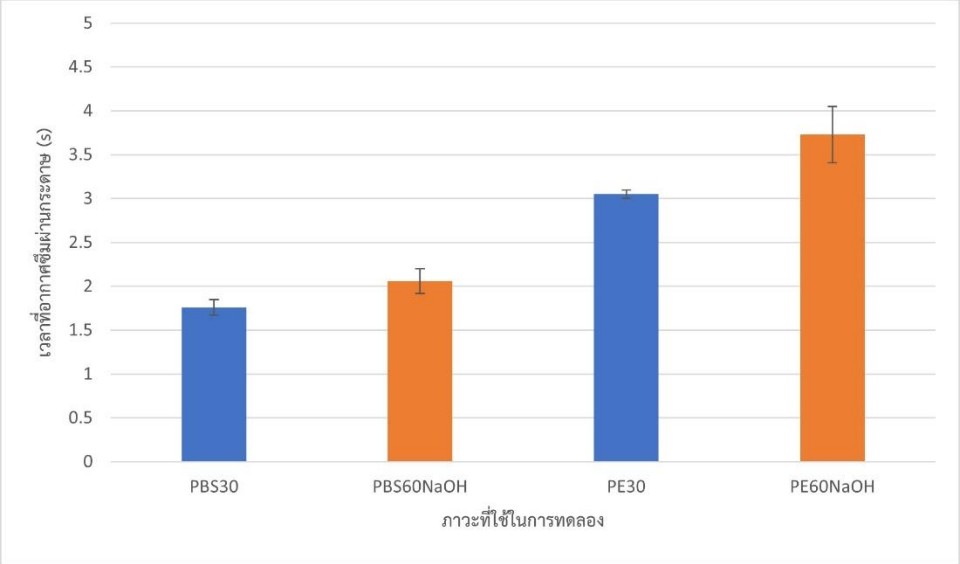
จากตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-1 พบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทั้ง 2 ภาวะจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กว้างกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน อาจเป็นผลมาจากขนาดของเยื่อ ดังตารางที่ 4-2 ที่แสดงให้เห็นว่าเยื่อจากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความยาวเฉลี่ยมากกว่า ทำให้การจัดเรียงตัวของเส้นใยทำได้ไม่ดี จึงเกิดความฟ่าม (Bulk) กว่า กระดาษที่ผลิตออกมาจึงมีความหนาแน่นน้อยกว่า ส่วนเยื่อจากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน

จะมีเส้นใยที่สั้นกว่า การเกาะและการอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยจะทำได้ดีกว่า กระดาษที่ผลิตออกมาจึงหนาแน่นกว่า สำหรับผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใส่ไปนั้น ไม่ได้มีผลต่อความหนาแน่นของกระดาษมากนัก

4.2.3.2 ความต้านทานอากาศ (Air resistance)

ตารางที่ 4-5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของเวลาที่อากาศซึมผ่านกระดาษ

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	**เวลาที่อากาศซึมผ่าน [s]**
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	1.76 ± 0.1
PBS60NaOH	2.06 ± 0.1
PE30	3.05 ± 0.0
PE60NaOH	3.73 ± 0.3



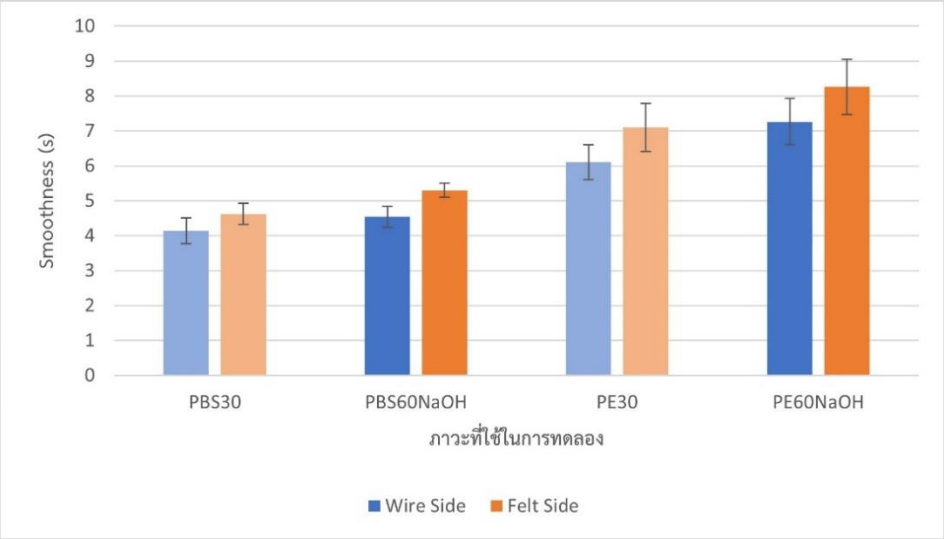
ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงเวลาที่อากาศซึมผ่านกระดาษทั้ง 2 ภาวะ

จากตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-2 พบว่าเวลาที่อากาศใช้ในการไหลผ่านกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนนานกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อจากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงว่าเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนเมื่อนำมาขึ้นแผ่นแล้ว ให้กระดาษที่มีความสามารถในการต้านทานอากาศที่ดีกว่า ซึ่งเป็นผลจากการที่เยื่อมีขนาดของเส้นใยสั้น สามารถอุดรูพรุนได้ดีกว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนจึงมีความพรุนน้อยกว่า

4.2.3.3 ความเรียบ (Smoothness)

ตารางที่ 4-6 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าความเรียบกระดาษ

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ความเรียบ [s]	
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.	
	ด้านตะแกรง	ด้านสักหลาด
PBS30	4.14 ± 0.4	4.62 ± 0.3
PBS60NaOH	4.54 ± 0.3	5.30 ± 0.2
PE30	6.10 ± 0.5	7.10 ± 0.7
PE60NaOH	7.26 ± 0.7	8.26 ± 0.8



ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงค่าความเรียบของกระดาษ

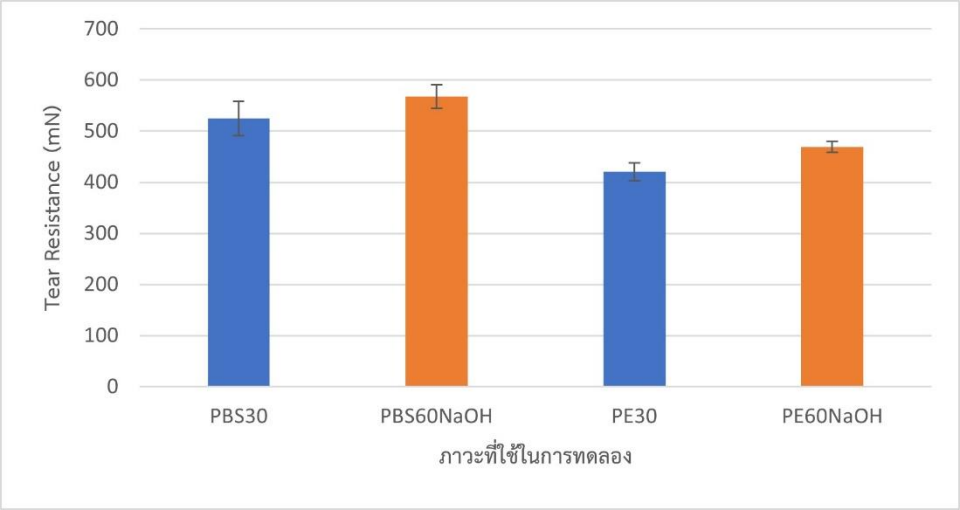
ตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-3 แสดงค่าความเรียบของกระดาษทั้งสองด้าน ได้แก่ ด้านตะแกรง (Wire side) และด้านสักหลาด (Felt side) พบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนให้ความเรียบมากกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อจากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงว่า กระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนเมื่อนำมาตีกระจายเยื่อแล้ว ให้เส้นใยที่สั้นกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และเมื่อเปรียบเทียบเวลาในการตีกระจายเยื่อพบว่า เมื่อให้เวลาในการตีกระจายเยื่อเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีเป็น 60 นาที จะให้กระดาษที่มีความเรียบมากกว่า และจากค่าความเรียบระหว่างสองหน้าของกระดาษ (Two-sidedness) พบว่าด้านสักหลาดให้ความเรียบมากกว่าด้านตะแกรง ซึ่งเป็นผลจากการที่ด้านสักหลาดมีพวก Filler และ Fines อยู่มาก ในขณะที่ด้านตะแกรงมักจะมีเส้นใยใหญ่ ๆ อยู่

ในขณะเดียวกันจะพบว่าความเรียบของกระดาษมีความสัมพันธ์กับความต้านทานอากาศ ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4-2 และ 4-3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลระยะเวลาที่อากาศซึมผ่านกระดาษทั้ง 2 ภาวะ (Air resistance) และค่าความเรียบของกระดาษ พบว่าแนวโน้มของกราฟเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากกระดาษที่มีเนื้อแน่นที่อาจเกิดจากเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีการเรียงตัวที่แนบชิดกว่า ทำให้รูพรุนทั้งในเนื้อกระดาษและที่ผิวหน้ากระดาษน้อยกว่า

4.2.3.4 ความต้านทานแรงฉีก (Tear Resistance)

ตารางที่ 4-7 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษ

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ความต้านทานแรงฉีก [mN]
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	524.852 ± 33.8
PBS60NaOH	567.217 ± 23.3
PE30	420.509 ± 17.0
PE60NaOH	469.150 ± 10.6



ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษของกระดาษทั้ง 2 ภาวะ

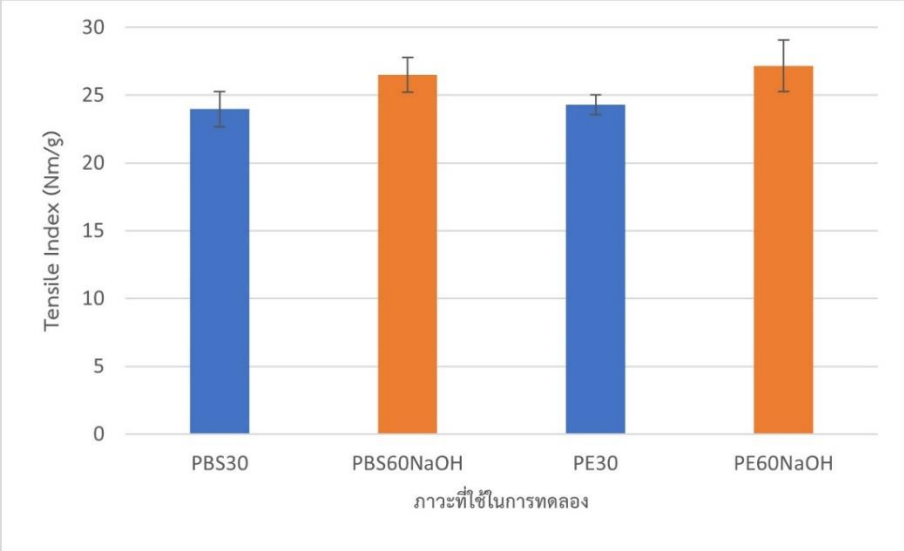
จากตารางที่ 4-7 และภาพที่ 4-4 พิจารณาชนิดของกระดาษ พบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถทนต่อแรงฉีกได้มากกว่า และเมื่อพิจารณาจากผลของการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็สามารถต้านทานแรงฉีกได้มากกว่าเช่นกัน เนื่องจากค่าความต้านทานแรงฉีกจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเป็นหลัก ซึ่งจากผลการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใยดังตารางที่ 4-2 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีขนาดที่ยาวกว่า และใน

ขณะเดียวกัน เส้นใยจากเยื่อที่มีการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ก็ยาวกว่าเช่นกัน ซึ่งขนาดเส้นใยที่ยาวจะทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงกว่า ดังนั้นเมื่อนำเยื่อมาผลิตกระดาษจะทำให้กระดาษสามารถทนต่อแรงฉีกได้ดีกว่า

4.2.3.5 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ตารางที่ 4-8 ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	**ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง [Nm/g]**
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	23.97 ± 1.31
PBS60NaOH	26.50 ± 1.28
PE30	24.30 ± 0.74
PE60NaOH	27.17 ± 1.92



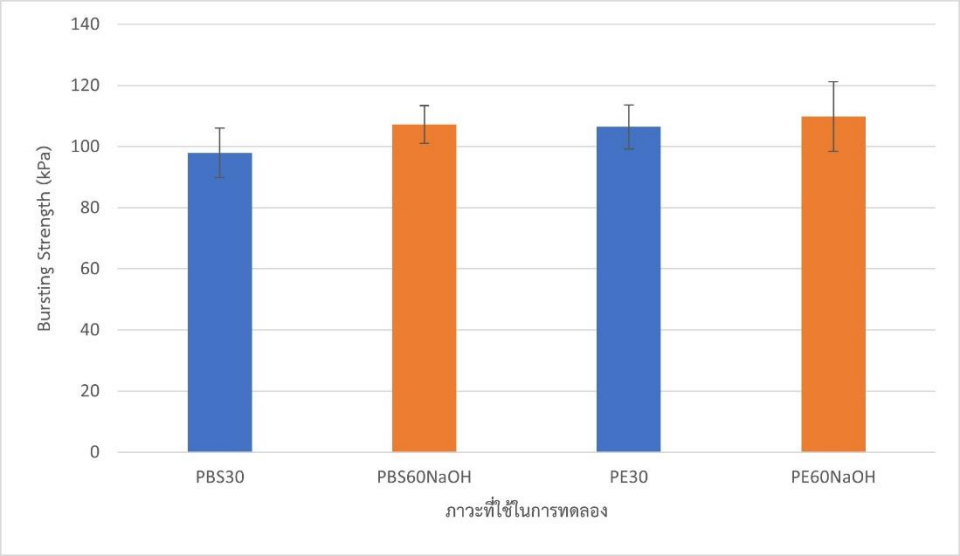
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

ตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-5 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง พบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าในทั้ง 2 ภาวะ เนื่องจากค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงจะมีแนวโน้มตามความแข็งแรงและจำนวนพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลัก ซึ่งเยื่อจากกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนอาจมีการสร้างพันธะที่มากกว่า เนื่องจากกระดาษมีความหนาแน่นสูงกว่า เส้นใยมีความแนบชิดกัน ส่งผลให้มีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามสารเคลือบที่ตกค้างอยู่ในวัตถุดิบก็อาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงได้เช่นกัน หากในเยื่อมีสารเคลือบตกค้างอยู่มากก็อาจส่งผลให้กระดาษมีความเหนียวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากในการผลิตกระดาษมีการอบด้วยความร้อน อาจทำให้สารเคลือบละลายเชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกัน สำหรับผลของภาวะในการตีกระจาย พบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่มีการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์มีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่มากกว่า อาจเป็นเพราะเส้นใยยาวกว่าและมีความแข็งแรงกว่า

4.2.3.6 ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength)

ตารางที่ 4-9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษ

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	**ความต้านทานแรงดันทะลุ [kPa]**
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	93.1 ± 8.13
PBS60NaOH	102.9 ± 6.16
PE30	102.9 ± 7.15
PE60NaOH	117.8 ± 11.44



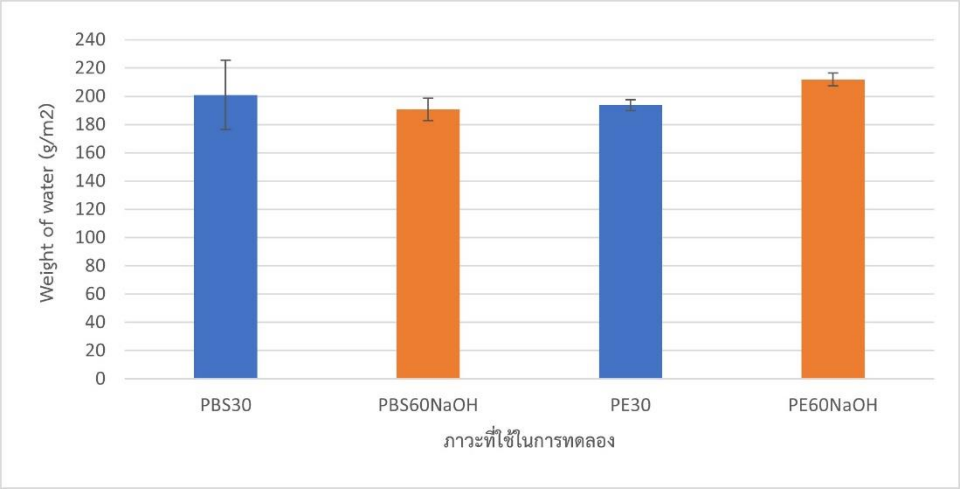
ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษทั้ง 2 ภาวะ

ตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-6 แสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึง กล่าวคือ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนมีความต้านทานแรงดันทะลุที่มากกว่า อาจเป็นผลมาจากการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเช่นเดียวกัน และอีกหนึ่งปัจจัยที่อาจมีผล คือ ในระหว่างการตีกระจาย การแยกพลาสติกพอลิเอทิลีนออกจากกระดาษทำได้ยากกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เพราะฉะนั้นเยื่อที่ได้อาจยังมีชิ้นส่วนพลาสติกผสมอยู่ และเมื่อนำมาขึ้นแผ่นกระดาษ ผสมอยู่ในเนื้อกระดาษด้วย ซึ่งการมีพลาสติกอาจเป็นการช่วยเพิ่มความเหนียวของกระดาษได้ ทำให้เมื่อนำไปทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุหรือแม้แต่ความแข็งแรงต่อแรงดึง กระดาษที่มีพลาสติกพอลิเอทิลีนอยู่นี้ จะสามารถต้านทานแรงดังกล่าวได้ดีกว่า

4.2.3.7 สมบัติการซึมน้ำโดยวิธี Cobb Test

ตารางที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าน้ำหนักน้ำ (Weight of water)

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	Weight of water [g/m^2]
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	200.90 ± 24.47
PBS60NaOH	190.70 ± 7.78
PE30	193.70 ± 3.96
PE60NaOH	211.85 ± 4.60



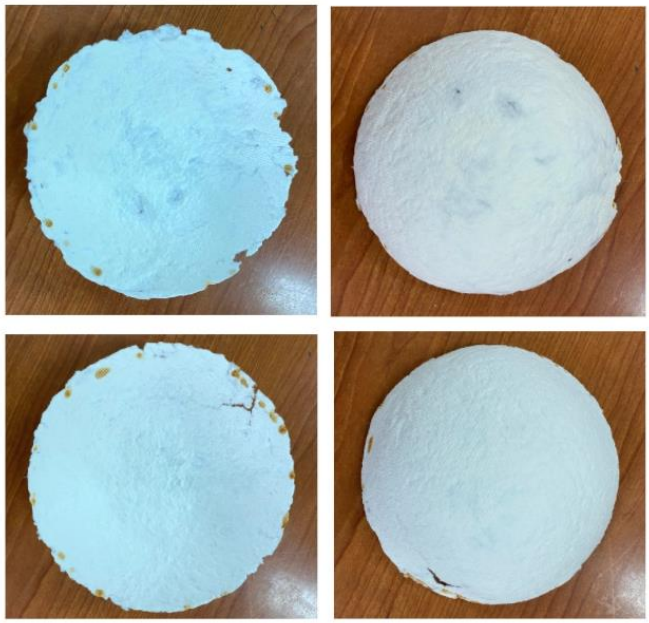
ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงค่าการทดสอบสมบัติการซึมน้ำโดยวิธี Cobb Test

ตารางที่ 4-10 และภาพที่ 4-7 แสดงผลการทดสอบสมบัติการซึมน้ำโดยวิธี Cobb test จะเห็นว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีนและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทั้ง 2 ภาวะ มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีเกือบจะเท่ากัน เห็นได้จากค่า Weight of water หรือค่าน้ำหนักของน้ำที่ซึมลงไปในกระดาษไม่ค่อยแตกต่างกันมาก จากภาพที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่ากราฟไม่มีแนวโน้ม (Trend) ที่ชัดเจนในการใช้เพื่อเปรียบเทียบสมบัติการซึมน้ำของกระดาษทั้งหมดได้ ทางคณะผู้วิจัยจึงไม่นำค่าการทดสอบดังกล่าวมาใช้ในการสรุปผลการทดลอง

4.3 ผลการนำเยื่อมาทดลองขึ้นรูปเป็นถ้วยกระดาษ

ในระหว่างการทดลองนำเยื่อที่บดได้จากถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ และเยื่อที่บดได้จากถ้วยกระดาษทั่วไป ซึ่งใช้เวลาในการตีกระจาย 30 นาทีเท่ากัน มาทดลองผลิตเยื่อขึ้นรูปด้วยการนำกระชอนสแตนเลสประกบไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างของเยื่อกระดาษ พบว่าเยื่อที่ได้จากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนสามารถเกลี่ยเยื่อลงบนผิวของกระชอนได้ดีกว่าเยื่อที่ได้จากกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งตัวเยื่อมีการจับตัวกันเป็นกระจุกบนผิวของกระชอน

เมื่อนำเยื่อที่ถูกประกบไว้แล้วเข้าตู้อบเพื่ออบเยื่อให้มีความแห้งและสามารถคงรูปได้ พบว่าลักษณะภายนอกของถ้วยกระดาษทั้งสอง ไม่มีความแตกต่างกันมากหากสังเกตจากด้านข้าง แต่เมื่อสังเกตด้านบนและด้านล่างของถ้วยกระดาษ พบว่าถ้วยกระดาษขึ้นรูปที่ได้จากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนให้ผิวที่เรียบกว่าถ้วยกระดาษขึ้นรูปที่ได้จากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ในขณะที่ถ้วยกระดาษจากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกิดรูอากาศ กระดาษจับตัวกันเป็นกระจุกอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ผิวของถ้วยกระดาษไม่เรียบ ดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ภาพแสดงลักษณะของถ้วยที่ได้จากการขึ้นรูปน้ำเยื่อกระดาษทั้ง 2 ชนิด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการตีกระจายถ้วยกระดาษ

จากทั้ง 8 ภาวะการทดลอง พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) ให้ผลผลิตที่มากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) แต่ภาวะที่ใช้ในการตีกระจาย ทั้งปัจจัยจากระยะเวลาและค่า pH ไม่ได้ส่งผลมากนัก ดังนั้นจึงเลือกเพียง 2 ภาวะ ได้แก่ ภาวะที่มีความรุนแรงต่ำที่สุดและสูงที่สุด มาใช้ในการทดลองในขั้นต่อ ๆ ไป

5.1.2 ผลการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย

จากการนำเยื่อที่ได้จากกระดาษทั้ง 2 ชนิดไปทำการวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย พบว่าเส้นใยของเยื่อที่ได้จากกระดาษเคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) มีความสมบูรณ์กว่าเส้นใยของเยื่อที่ได้จากกระดาษเคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) และการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และเพิ่มระยะเวลาในการตีกระจายทำให้ตีกระจายกระดาษออกมาได้มากขึ้น จึงได้ช่วงขนาดของเส้นใยที่กว้างกว่า

5.1.3 ผลการทดสอบสมบัติกระดาษ

เมื่อนำเยื่อมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ พบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อจากกระดาษเคลือบพอลิเอทิลีน (PE) ให้สมบัติที่ดีกว่า ดังนั้น ถ้วยกระดาษจุฬาซีโร่เวสต์ซึ่งผลิตจากกระดาษเคลือบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) จึงไม่เหมาะกับการนำมาขึ้นรูปเป็นกระดาษใหม่

5.1.4 ผลการนำเยื่อมาทดลองขึ้นรูปเป็นถ้วยกระดาษ

ถ้วยกระดาษขึ้นรูปที่ได้จากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (PE) มีผิวที่เรียบกว่า ส่วนถ้วยกระดาษขึ้นรูปที่ได้จากเยื่อกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) มีลักษณะเป็นรู เส้นใยเกาะเป็นประจุก ทำให้ผิวไม่เรียบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทดลองศึกษาสมบัติการเปียกผิวของกระดาษ โดยใช้การวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ทดแทนวิธีการวัดการซึมน้ำแบบ Cobb test เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว และเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นำมาทดสอบเพื่อให้เห็นแนวโน้มของการซึมน้ำของกระดาษได้ดี

5.2.2 ควรใช้วิธีการแยกน้ำออกจากเยื่อที่ได้จากการตีกระจายแล้ว ด้วยวิธีการปั่นแยกน้ำให้หมาด แทนการใช้แรงจากมือบีบเอาน้ำออก ซึ่งอาจทำให้ความชื้นของเยื่อในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน

เอกสารอ้างอิง

1 **10 เหตุผลที่ทำไมการรีไซเคิลไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม,** แหล่งข้อมูล: http://yongrecycle.blogspot.com/2013/06/10.html. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

2 Thaiprint.com. **โรงพิมพ์ยุคใหม่ใส่ใจโลกกับหมึก Soy ink,** แหล่งข้อมูล: https://www.thaiprintshop.com. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

3 **กระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ถ้วย,** แหล่งข้อมูล: http://www.thaipaper.com/products-and-services/hilight-product/food-and-hygiene/. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2564.

4 **กระบวนการผลิตกระดาษ**, แหล่งข้อมูล: http://www.paperlandonline.com/knowledge.php?ID=7. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2564.

5 **การรีไซเคิลขยะที่เป็นกระดาษ,** แหล่งข้อมูล: https://sites.google.com/site/36paperrecycling2556/kar-risikheil-khya-thi-penk-ra-das. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

6 **การรีไซเคิลพลาสติก,** แหล่งข้อมูล: https://prodigy.co.th/th/. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

7 **แก้วนี้ดีใช้แล้วลดขยะพลาสติก Zero-waste cup,** แหล่งข้อมูล: http://www.chulazerowaste.chula.ac.th/zero-waste-cup/. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2564.

8 **คุณสมบัติโครงสร้างกระดาษ,** แหล่งข้อมูล: http://www.jrprinting.net. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2564.

9 จาก “บทที่ 8 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภท พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate),” โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, รายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ, น.1-8.

10 จาก “บทที่ 10 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพลาสติกชีวภาพพอลิเอทิลีน (Bio-Polyethylene),” โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, รายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ, น.1-4.

11 ชญาดา ลิบลับ. **การศึกษาหมึกพิมพ์ที่เหมาะสมต่อฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**, 2554: 44-50.

12 ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ. (2561). **สมบัติกระดาษ (Paper Properties)**, เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา 2313435 ปฏิบัติการทดสอบกระดาษ (Paper Testing Laboratory), กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

13 ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ (2562). **การขึ้นแผ่น Handsheet**, เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา 2313435 ปฏิบัติการทดสอบกระดาษ (Paper Testing Laboratory), กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

14 ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ. (2562). **ความเรียบของกระดาษ**, เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา 2313435 ปฏิบัติการทดสอบกระดาษ (Paper Testing Laboratory), กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

15 ทีมข่าวสิ่งแวดล้อมกองบรรณาธิการสานักข่าวสิ่งแวดล้อม. **จุฬาฯ พัฒนา ‘แก้วกระดาษ’ ย่อยได้ ใน 4 เดือน เตรียมบังคับใช้ทั่วมหาวิทยาลัยแทน ‘พลาสติก’**, แหล่งข้อมูล: https://greennews.agency/?p=17453. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

16 บริษัท หงส์ไทยบรรจุภัณฑ์ จำกัด. **การดูดซึมน้ำ,** แหล่งข้อมูล: https://www.hongthai.co.th/th/knowledge/. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2564.

17 บริษัท หงส์ไทยบรรจุภัณฑ์ จำกัด. **แก้วกระดาษ วัสดุทำจากอะไร ใช้กับธุรกิจด้านไหนบ้าง**,

แหล่งข้อมูล: https://hongthaipackaging.com/paper-cupsarticles/what-is-the-glass-of-paper-made-of/. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

18 บริษัท หงส์ไทยบรรจุภัณฑ์ จำกัด. **ความต้านทานแรงดันทะลุ,** แหล่งข้อมูล: https://www.hongthai.co.th/th/knowledge/bursting-strength/. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2564.

19 ผศ.สมพร ชัยอารีย์กิจ. (2562). **ชนิดของเส้นใย**, เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา 2313335 เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ (Pulp/Paper Tech), กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

20 ผศ.สมพร ชัยอารีย์กิจ. (2562). **สารยึดที่ใช้ในการเคลือบผิว**, เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา 2313335 เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ (Pulp/Paper Tech), กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

21 ผศ.ดร. สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์. (2563). **องค์ประกอบของหมึกพิมพ์**, เอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา 2313365 พื้นฐานวัสดุหมึก (Fund Print Ink Mat), กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

22 **พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ,** แหล่งข้อมูล: https://www.bio-eco.co.th/bioplastics. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

23 **โพลีเอทิลีน Polyethylene (PE) หรือ PE คือพลาสติกชนิดใด ใช้ทำอะไรได้บ้าง,** แหล่งข้อมูล: https://www.watanabhand.co.th. สืบค้นเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม 2564.

24 รศ.ปรีชา พหลเทพ. **การผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก โพลีเอทิลีน Polyethylene (PE),** แหล่งข้อมูล: https://sites.google.com/site/phlitphanththwyphlastik/phlastik-pe. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2563.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์

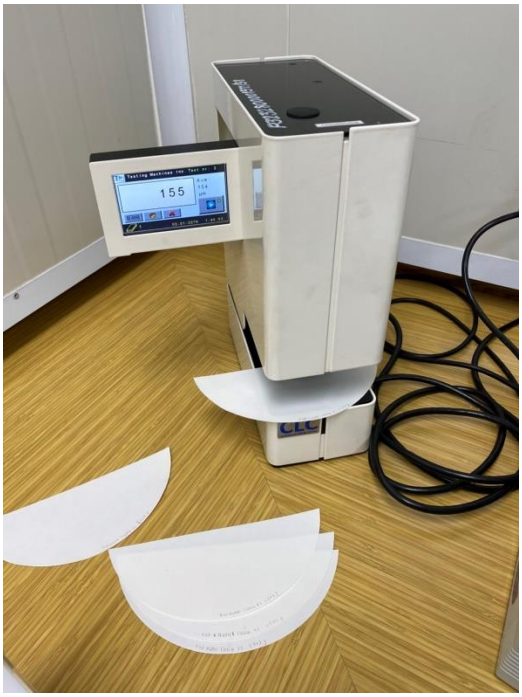
ภาพที่ ก-1 เครื่องบดเยื่อ (Valley beater)

ภาพที่ ก-2 เครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrator)

ภาพที่ ก-3 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former)

ภาพที่ ก-4 เครื่องวัดความชื้น (Moisture determination balance)

ภาพที่ ก-5 เครื่องวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber Quality Analyzer)



ภาพที่ ก-6 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (Thickness tester)

ภาพที่ ก-7 เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester)

ภาพที่ ก-8 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester)

ภาพที่ ก-9 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Tear tester)

ภาพที่ ก-10 เครื่องวัดความพรุน (Porosity tester)

ภาพที่ ก-11 อุปกรณ์ทดสอบการซึมน้ำ (Cobb sizing tester)

ภาพที่ ก-12 ตะแกรงร่อนเยื่อ

ภาพที่ ก-13 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH meter)

ภาพที่ ก-14 ตู้อบ Venticell, Germany

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณเพื่อหาน้ำหนักกระดาษและน้ำที่ใช้สำหรับการแช่กระดาษก่อนนำไปตีกระจาย

หลังจากนำกระดาษไปวัดความชื้น และคำนวณความชื้นเฉลี่ยแล้ว แทนว่า ความชื้น%

หาปริมาณเยื่อแห้ง = 100 - ความชื้น [%]

โดยต้องทราบว่าต้องการเยื่อแห้งในการตีกระจายกี่กรัม ส่วนปริมาตรน้ำจะเติมเพื่อให้เยื่อมีความเข้มข้น 1.57%

นำปริมาณเยื่อแห้งไปเทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อหาน้ำหนักกระดาษที่ต้องใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

กระดาษมีความชื้นเฉลี่ย 7.5%

มีปริมาณเยื่อแห้ง = 100 – 7.5

= 92.5

ต้องการเยื่อแห้ง 200 กรัม ในน้ำ 12,738 กรัม (ความเข้มข้น 1.57%)

ต้องการเยื่อ 92.5 กรัม ต้องใช้กระดาษ 100 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อ 200 กรัม ต้องใช้กระดาษ $\frac{100 \times 200}{92.5}$ กรัม

2. การคำนวณน้ำหนักเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่นกระดาษ

2.1 คำนวณน้ำหนักเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่น 1 แผ่น

ต้องการขึ้นแผ่นแบบ ISO Handsheets เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร

คำนวณหาพื้นที่ของแผ่นกระดาษ :

พื้นที่วงกลม = πr^2 โดย r คือ รัศมี [เมตร]

$= 3.14 \times (10 \times 10^{-2})^2$

พื้นที่วงกลม = 0.0314 ตารางเมตร

ต้องการขึ้นแผ่นกระดาษ 80 กรัมต่อตารางเมตร (แกรม) นำไปคำนวณโดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์ จะได้ว่า เยื่อที่ต้องใช้ต่อ 1 แผ่น เท่ากับ 2.5143 กรัม

2.2 คำนวณน้ำหนักเยื่อแห้งที่ต้องใช้ โดยทั่วไปแล้วการขึ้นแผ่นสำหรับการทดสอบจะขึ้นทีละ 1 ชุด ซึ่งประกอบด้วย 5 แผ่น แต่อาจจะมีการทำเผื่อเสียไว้ด้วย ในการทดลองนี้จึงจะเตรียมเยื่อสำหรับการทดสอบทั้งหมด 10 แผ่น (ตัวอย่างการคำนวณ ใช้ค่าจากเยื่อที่ตีกระจายในภาวะ PBS30 ซึ่งเยื่อมีความชื้นเฉลี่ย 73.70% คิดเป็นเยื่อแห้ง 100 – 73.70 = 26.30%)

ตัวอย่างการคำนวณ

คำนวณเยื่อที่ต้องตักมา (สำหรับ 10 แผ่น)

เยื่อมีความชื้น 73.70% มีเยื่อแห้ง 26.30%

มีเยื่อแห้ง 26.30 กรัม ในเยื่อเปียก 100 กรัม

ต้องการเยื่อแห้ง 25.143 กรัม ต้องตักเยื่อเปียก $\frac{100 \times 25.143}{26.30}$ = 95.6012 กรัม

2.3 หาความเข้มข้นเยื่อในเครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrator) โดยจะใส่ทั้งเยื่อและน้ำลงไปในเครื่องทั้งหมด 2,000 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

ต้องเติมน้ำเพิ่ม 2000 – 95.6012 (น้ำหนักเยื่อเปียก) = 1901.3988 กรัม

หาความเข้มข้นเยื่อในเครื่อง :

ในน้ำ 2000 กรัม มีเยื่อแห้ง 25.143 กรัม

ในน้ำ 100 กรัม มีเยื่อแห้ง $\frac{25.143 \times 100}{2000}$ = 1.2600 กรัม

เพราะฉะนั้น เยื่อในเครื่องกระจายเยื่อมีความเข้มข้น 1.26%

2.4 ปรับความเข้มข้นน้ำเยื่อให้เหมาะสมสำหรับการขึ้นแผ่น คือประมาณ 0.3-1.0% โดยปกติใน Headbox ของเครื่องผลิตกระดาษจะอยู่ที่ 0.5%

ตัวอย่างการคำนวณ

จากความเข้มข้นเยื่อในเครื่องตีกระจายเท่ากับ 1.26% จะทำการปรับความเข้มข้นให้เป็น 0.5%

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

$1.26\ (2000) = 0.5\ (V_2)$

$V_2 = 5040$ กรัม

2.5 เตรียมน้ำเยื่อสำหรับขึ้นแผ่น

เมื่อได้เยื่อที่มีความเข้มข้น 0.5 แล้ว จะทำการคำนวณปริมาตรน้ำเยื่อสำหรับขึ้นแผ่น เนื่องจากต้องการขึ้นแผ่นขนาด 80 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งต้องใช้เยื่อ 2.5143 กรัม มีวิธีการคำนวณดังแสดงในตัวอย่าง

ตัวอย่างการคำนวณ

เยื่อมีความเข้มข้น 0.5% แสดงว่า มีเยื่อ 0.5 กรัม ในน้ำเยื่อ 100 กรัม

ดังนั้น ถ้าต้องการเยื่อ 2.5143 กรัม ต้องใช้น้ำเยื่อ $\frac{100 \times 2.5143}{0.5} = 502.86$ กรัม

3. การคำนวณน้ำหนักมาตรฐานกระดาษ [g/m^2]

น้ำหนักมาตรฐานกระดาษ [g/m^2] = $\frac{\text{น้ำหนักกระดาษ [g]}}{\text{พื้นที่กระดาษ [m}^2\text{]}}$

4. การคำนวณความหนาแน่นกระดาษ (Density)

$$\text{ความหนาแน่น } [g/cm^3] = \frac{\text{น้ำหนักมาตรฐาน } [g/cm^2]}{\text{ความหนา } [cm]}$$

5. การคำนวณหาความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

$$\text{ความแข็งแรงต่อแรงดึง } [kN/m] = \frac{\text{แรงที่ทำให้กระดาษขาด } [N]}{\text{ความกว้างของกระดาษ } [m]}$$

โดยแรงที่ทำให้กระดาษขาด คือค่าที่อ่านได้จากเครื่อง

การคำนวณหาดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

$$\text{ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง } [Nm/g] = \frac{\text{ความแข็งแรงต่อแรงดึง } [N/m]}{\text{น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ } [g/m^2]}$$

6. การคำนวณน้ำหนักน้ำ (Weight of water)

$$\text{น้ำหนักน้ำ } [g/m^2] = (\text{น้ำหนักสุดท้าย } [g] - \text{น้ำหนักเริ่มต้น } [g]) \times 100$$

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ค-1 แสดงน้ำหนัก น้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ย ความหนา และความหนาแน่นของกระดาษ

ภาวะในการทดลอง	แผ่นที่	น้ำหนัก [g]	น้ำหนักมาตรฐาน [g/m^2]	น้ำหนักมาตรฐาน [g/cm^2]	ความหนา [μm]	ความหนา [cm]	ความหนาแน่น [g/cm^3]	ความหนาแน่นเฉลี่ย [g/cm^3]
PBS30	1	2.550	81.210	0.00812	164	0.0164	0.495	0.502
	2	2.474	78.789	0.00788	160	0.0160	0.492	
	3	2.547	81.115	0.00811	155	0.0155	0.523	
	4	2.573	81.943	0.00819	167	0.0167	0.491	
	5	2.706	86.178	0.00862	170	0.0170	0.507	
PBS60NaOH	1	2.431	77.420	0.00774	149	0.0149	0.520	0.505
	2	2.408	76.688	0.00767	161	0.0161	0.476	
	3	2.392	76.178	0.00782	149	0.0149	0.511	
	4	2.575	82.006	0.00820	161	0.0161	0.509	
	5	2.532	80.637	0.00806	159	0.0159	0.507	
PE30	1	2.45	78.025	0.00780	152	0.0152	0.513	0.514
	2	2.437	77.611	0.00776	152	0.0152	0.511	
	3	2.451	78.057	0.00781	152	0.0152	0.514	
	4	2.482	79.045	0.00790	152	0.0152	0.520	
	5	2.503	79.713	0.00797	156	0.0156	0.511	
PE60NaOH	1	2.465	78.503	0.00785	154	0.0154	0.510	0.522
	2	2.511	79.968	0.00800	153	0.0153	0.523	
	3	2.513	80.032	0.00800	153	0.0153	0.523	
	4	2.501	79.650	0.00797	151	0.0151	0.527	
	5	2.573	81.943	0.00819	156	0.0156	0.525	

ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานอากาศ (Air resistance)

ภาวะในการทดลอง	เวลาที่อากาศซึมผ่าน [วินาที]					ค่าเฉลี่ย ± S.D.
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 4	แผ่นที่ 5	
PBS30	1.71	1.80	1.83	1.63	1.82	1.76 ± 0.1
PBS60NaOH	1.95	1.89	2.09	2.12	2.25	2.06 ± 0.1
PE30	3.02	3.06	3.00	3.03	3.12	3.05 ± 0.0
PE60NaOH	3.16	3.82	3.91	3.85	3.91	3.73 ± 0.3

ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบความเรียบ (Smoothness)

ภาวะในการทดลอง	ความเรียบด้านตะแกรง [วินาที]					ค่าเฉลี่ย ± S.D.
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 4	แผ่นที่ 5	
PBS30	4.4	3.7	4.6	4.1	3.9	4.14 ± 0.4
PBS60NaOH	4.8	4.8	4.6	4.1	4.4	4.54 ± 0.3
PE30	6.5	6.5	6.0	6.2	5.3	6.10 ± 0.5
PE60NaOH	7.4	7.8	6.2	7.8	7.1	7.26 ± 0.7

ภาวะในการทดลอง	ความเรียบด้านสักหลาด [วินาที]					ค่าเฉลี่ย ± S.D.
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 4	แผ่นที่ 5	
PBS30	4.6	4.1	4.8	4.1	3.9	4.62 ± 0.3
PBS60NaOH	5.1	5.1	5.5	4.1	4.4	5.30 ± 0.2
PE30	7.2	7.1	8.1	6.2	5.3	7.10 ± 0.7
PE60NaOH	8.8	6.9	8.5	7.8	7.1	8.26 ± 0.8

ตารางที่ ค-4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)

ภาวะในการทดลอง	ความต้านทานแรงฉีก [mN]					ค่าเฉลี่ย ± S.D.	Tear index [mN m^2/g]
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 4	แผ่นที่ 5		
PBS30	517.791	478.565	533.482	521.714	572.708	524.852 ± 33.8	6.561
PBS60NaOH	553.095	564.863	557.018	608.012	553.095	567.217 ± 23.3	7.090
PE30	423.647	396.189	423.647	443.261	415.802	420.509 ± 17.0	5.256
PE60NaOH	451.106	478.565	470.719	474.642	470.719	469.150 ± 10.6	5.864

ตารางที่ ค-5 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ภาวะในการทดลอง	แผ่นกระดาษที่	ครั้งที่	แรงที่ทำให้กระดาษขาด [N]	ระยะยืด [mm]	ความแข็งแรงต่อแรงดึง [kN/m]	ดัชนี [Nm/g]
PBS30	1	1	28.2	1.6	1.88	23.50
		2	26.2	1.2	1.75	21.83
	2	1	28.0	1.6	1.87	23.33
		2	28.0	1.5	1.87	23.33
	3	1	29.8	1.5	1.99	24.83
		2	29.4	1.6	1.96	24.50
	4	1	28.6	1.5	1.91	23.83
		2	28.0	1.6	1.87	23.33
	5	1	28.8	1.1	1.92	24.00
		2	32.6	1.7	2.17	27.17
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.		28.8 ± 1.7	1.5 ± 0.2	1.92 ± 0.11	23.97 ± 1.31
PBS60 NaOH	1	1	31.8	1.9	2.12	26.50
		2	30.4	1.9	2.03	25.33
	2	1	29.4	1.8	1.96	24.50
		2	29.4	1.8	1.96	24.50
	3	1	31.8	1.6	2.12	26.50
		2	32.6	1.9	2.17	27.17
	4	1	32.4	1.6	2.16	27.00
		2	33.0	1.9	2.20	27.50
	5	1	33.4	1.9	2.29	28.67
		2	32.8	1.7	2.19	27.33
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.		31.8 ± 1.6	1.8 ± 0.1	2.12 ± 0.10	26.50 ± 1.28

ภาวะในการทดลอง	แผ่นกระดาษที่	ครั้งที่	แรงที่ทำให้กระดาษขาด [N]	ระยะยืด [mm]	ความแข็งแรงต่อแรงดึง [kN/m]	ดัชนี [Nm/g]
PE30	1	1	29.2	1.9	1.95	24.33
		2	29.0	2.3	1.93	24.17
	2	1	28.8	2.1	1.92	24.00
		2	29.0	2.1	1.93	24.17
	3	1	29.2	2.2	1.95	24.33
		2	29.0	2.3	1.93	24.17
	4	1	28.0	1.7	1.87	23.33
		2	28.0	1.6	1.87	23.33
	5	1	31.0	2.1	2.07	25.83
		2	30.4	2.0	2.03	25.33
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.		29.2 ± 0.9	2.0 ± 0.2	1.94 ± 0.06	24.30 ± 0.74
PE60 NaOH	1	1	27.4	2.0	1.83	22.83
		2	30.0	2.1	2.00	25.00
	2	1	32.4	2.4	2.16	27.00
		2	32.4	2.6	2.16	27.00
	3	1	33.2	2.5	2.21	27.67
		2	32.0	2.3	2.13	26.67
	4	1	34.2	2.7	2.28	28.50
		2	33.8	2.4	2.25	28.17
	5	1	35.0	2.7	2.33	29.17
		2	35.6	2.2	2.37	29.67
	ค่าเฉลี่ย ± S.D.		32.6 ± 2.4	2.4 ± 0.2	2.17 ± 0.15	27.17 ± 1.92

ตารางที่ ค-6 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting strength)

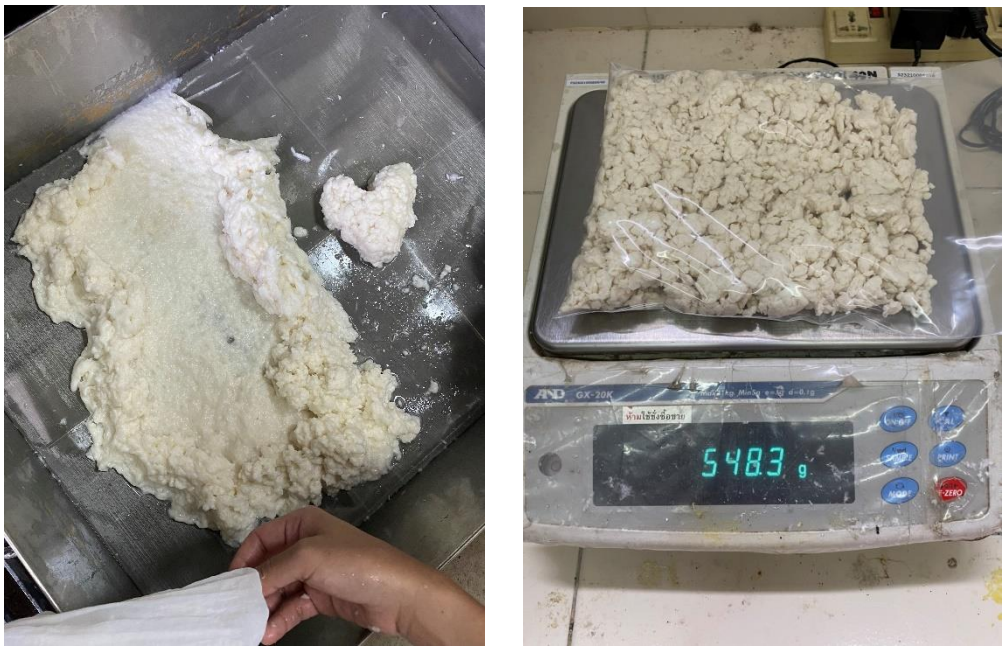
ภาวะในการทดลอง	ด้านทดสอบ	ความต้านทานแรงดันทะลุ [kPa]		ค่าเฉลี่ย ± S.D.
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
PBS30	ตะแกรง	92.7	103.0	97.9 ± 7.28
	สักหลาด	93.5	83.1	88.3 ± 7.35
PBS60NaOH	ตะแกรง	110.3	104.1	107.2 ± 4.38
	สักหลาด	95.4	101.7	98.6 ± 4.45
PE30	ตะแกรง	109.4	103.4	106.4 ± 4.24
	สักหลาด	105.9	92.8	99.4 ± 9.26
PE60NaOH	ตะแกรง	101.6	118.0	109.8 ± 11.60
	สักหลาด	127.1	124.4	125.8 ± 1.91

ตารางที่ ค-7 ผลการทดสอบสมบัติการซึมน้ำโดยวิธี Cobb test

ภาวะในการทดลอง	ด้านทดสอบ	น้ำหนักเริ่มต้น [g]	น้ำหนักสุดท้าย [g]	Weight of water [g/m^2]	ค่าเฉลี่ย ± S.D.
PBS30	ตะแกรง	1.307	3.489	218.2	200.90 ± 24.47
	สักหลาด	1.194	3.030	183.6	
PBS60NaOH	ตะแกรง	1.268	3.120	185.2	190.70 ± 7.78
	สักหลาด	1.190	3.152	196.2	
PE30	ตะแกรง	1.232	3.197	196.5	193.70 ± 3.96
	สักหลาด	1.214	3.123	190.9	
PE60NaOH	ตะแกรง	1.294	3.380	208.6	211.85 ± 4.60
	สักหลาด	1.286	3.437	215.1	

ภาคผนวก ง

ภาพผลที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ ง-1 เยื่อเปียกและเยื่อแห้งที่ได้จากการตีกระจาย

ภาพที่ ง-2 พลาสติกทั้ง 2 ชนิดที่ใช้เคลือบกระดาษ หลังผ่านการตีกระจายและอบให้แห้ง