



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ผลของเยื่อปุ่นที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์ครีต
(Effects of Kapok Pulp on Papercrete Properties)

ชื่อนิสิต	นางสาวบุญญดา	นิโรจน์	เลขประจำตัว	6032619523
	นางสาวปริญญา	การเกษ	เลขประจำตัว	6032620023

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์
ปีการศึกษา 2563

ผลของเยื่อไม้ที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์ครีต

Effects of Kapok Pulp on Papercrete Properties

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์

จัดทำโดย

นางสาว บุญญดา	นิโรจน์	เลขประจำตัว	6032619523
นางสาว ปริญญา	การเกษ	เลขประจำตัว	6032620023

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2563

หัวข้อโครงการ ผลของเยื่อไม้ที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์ครีต

(Effects of Kapok Pulp on Papercrete Properties)

นิสิตผู้ดำเนินโครงการ นางสาว บุญญดา นิโรจน์

นางสาว ปริญญา การเกษ

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. วันทนี พุกกะคุปต์

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับว่าโครงการส่งเสริมประสบการณ์เรื่อง “ผลของเยื่อไม้ที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์ครีต” เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

พิชญา เกตุเมฆ

หัวหน้าภาควิชาฯ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญา เกตุเมฆ)

สมพร ชัยอารีย์กิจ

.....อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันทนี พุกกะคุปต์)

ผู้ดำเนินงาน นางสาว บุญญดา นิโรจน์ รหัสนิสิต 6032619523
นางสาว ปริญญา การเกษ รหัสนิสิต 6032620023

ชื่อเรื่อง ผลของเยื่อぬที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์คริต

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. วันทนี พุกกะคุปต์

บทคัดย่อ : เปเปอร์คริต (Papercrete) คือ วัสดุก่อสร้างได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ มีความแข็งแรง มีน้ำหนักเบา ดูดซับเสียงและทนความร้อนได้ดี รวมถึงสามารถช่วยลดปัญหาขยะและการเกิดภาวะโลกร้อนได้ เพราะเปเปอร์คริตผลิตได้จากการนำกระดาษเหลือใช้มาผสมกับทราย ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และน้ำ ก่อนจะนำไปอัดขึ้นรูป เปเปอร์คริตเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับงานใช้ภายใน การทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ และของตกแต่งบ้านต่าง ๆ ที่ไม่ต้องสัมผัสความชื้นเป็นเวลานาน เนื่องจากธรรมชาติของเส้นใยกระดาษที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลสซึ่งชอบน้ำจึงทำให้เปเปอร์คริตมีข้อจำกัดในเรื่องการของการต้านทานการซึมน้ำ คณะผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่จะนำเส้นใยぬมาใช้แทนที่เส้นใยกระดาษในการเตรียมเปเปอร์คริต เนื่องจากธรรมชาติของเส้นใยぬมีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลสเช่นเดียวกัน แต่ที่ผิวของเส้นใยぬนั้นมีซี่ผึ้งควินเคลือบอยู่ ทำให้เส้นใยぬมีสมบัติไม่ชอบน้ำมาก (Superhydrophobic) ซึ่งอาจสามารถเพิ่มการต้านทานการซึมน้ำของเปเปอร์คริตได้ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของเส้นใยぬที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์คริต โดยเปรียบเทียบกับเส้นใยกระดาษ ซึ่งเป็นเส้นใยสั้นผสมกับเส้นใยยาวทางการค้า โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 คือ การเตรียมเส้นใยทั้ง 2 ชนิด คือ เส้นใยぬ และ เส้นใยกระดาษ แบ่งเส้นใยส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใย และขึ้นแผ่นกระดาษก่อนนำไปทดสอบ จากนั้นนำส่วนที่เหลือไปทำเปเปอร์คริตในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนการผสม คือ ทราย : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ : เยื่อแห้ง : น้ำ เท่ากับ 1 : 0.75 : 0.175 : 0.625 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ แล้วทำการบ่มเป็นเวลา 1, 3 และ 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบ ผลการทดลองที่ได้จากแผ่นกระดาษทดสอบพบว่า แผ่นทดสอบที่เตรียมจากเส้นใยぬมีความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากกว่า หากแต่มีความต้านทานแรงฉีกต่ำกว่าแผ่นทดสอบที่เตรียมจากเส้นใยกระดาษ เนื่องจากเส้นใยぬมีความแข็งแรงแต่มีความเปราะ ส่วนผลการทดสอบเปเปอร์คริตที่เตรียมได้พบว่า เปเปอร์คริตที่ผลิตจากเส้นใยぬมีความทนต่อแรงดัดโค้งอยู่ที่ 15.18 mPa ในขณะที่เปเปอร์คริตจากเส้นใยกระดาษมีความทนต่อแรงดัดโค้งสูงถึง 34.55 mPa ทั้งนี้เป็นเพราะความเปราะของเส้นใยぬ ทำให้รับแรงที่มากกระทำในแนวตั้งฉากได้น้อย รวมถึงสมบัติของぬที่ไม่ชอบน้ำมาก (Superhydrophobic) ทำให้ぬไม่สามารถเข้าร่วมเป็นส่วนผสมเนื้อเดียวกับองค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวนำพาของเปเปอร์คริตได้ ส่งผลให้เปเปอร์คริตที่เตรียมจากเส้นใยぬมีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเปเปอร์คริตที่เตรียมจากเส้นใยกระดาษ

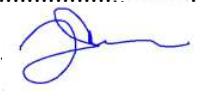
ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต..... บุญญดา นิโรจน์

ลายมือชื่อนิสิต..... ปริญญา การเกษ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาหลัก..... อสมพร ชัยอารีย์กิจ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... 

Student name Ms. Boonyada Niroj ID No. 6032619523

Student name Ms. Parinya Karaked ID No. 6032620023

Project name Effects of Kapok Pulp on Papercrete Properties

Project advisor Assist. Prof. Somporn Chairrekij

Project co-advisor Assoc. Prof. Dr. Wantanee Buggakupta

Abstract: Papercrete is construction material that has become continuously popular due to its low cost, good strength, light weight, sound proof and heat resistance. It is also able to reduce solid waste and global warming because papercrete is prepared by mixing waste paper with sand, portland cement and water before pouring the mixture into a block. Papercrete is suitable for internal use such as furniture and various home decoration items which long time moisture explosion should be avoided. This is because paper fiber contains cellulose which is hydrophilic and this makes water resistance of papercrete become limited. That is why the idea of using kapok fiber to replace paper fiber in papercrete production was triggered since kapok fiber also has cellulose but its fiber surface covered by cutin wax which makes kapok fiber superhydrophobic. Thus, papercrete made from kapok fibers may have higher water resistance. This research was then aimed to study the effects of kapok fiber compared to paper fiber which was commercial hardwood fiber mixed with softwood fiber on papercrete properties. The experiment was divided into 2 parts. The first part was preparation of kapok and paper fibers. Then, fiber morphology of these two fiber samples was analyzed. Handsheets of these two fiber samples were also prepared and then tested. In second part, papercretes were made from these two fiber types individually using the ratio of sand : portland cement : dry fiber : water equal to 1 : 0.75 : 0.175 : 0.625 (weight ratio), respectively. Then, the prepared papercretes were cured for 1, 3 and 7 days before testing. It was found that kapok handsheet had higher tensile and burst strengths but lower tear resistance as compared to paper handsheet. This may be because kapok fiber is strong but brittle. The results obtained from papercrete testing indicate that papercrete made from kapok fiber had a flexural strength of 15.18 mPa, while papercrete made from paper fiber had a higher flexural strength of 34.55 mPa. This is probably because kapok fiber could not well tolerate the force acting on it perpendicularly due to its brittleness. Apart from that, due to its superhydrophobic nature, kapok fiber could not well mix with other components which mix with water quite well in papercrete. Consequently, papercrete made from kapok fiber had lower strength than papercrete made from paper fiber.

Department: Imaging and Printing Technology

Student's signature.....*Boonyada Niroj*.....

Student's signature.....*Parinya Karaked*.....

Advisor's signature.. *Somporn Chij*

Academic year: 2020

Co-advisor's signature.. *Wantanee*

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเสริมประสบการณ์การเรียนรู้ด้วยตนเอง เรื่อง ผลของเยื่อไม้ที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์ครีต (Effects of Kapok Pulp on Papercrete Properties) นี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือ และสนับสนุนจากหลายภาคส่วน จึงขอขอบคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ และ รองศาสตราจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์ สำหรับคำแนะนำ ข้อคิดเห็น แนวทางในการทดลอง รวมถึงความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอดจนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินการตลอดโครงการนี้

ขอขอบคุณ คุณกมลรัตน์ กิตติคุณพงศ์ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์พัฒนาผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยี SCG บ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี สำหรับความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการบดกระจายเยื่อไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญของโครงการนี้

ขอขอบคุณ นายบุญนาค นิโรจน์ และ นางสาว สุภัทสรสญา จันทร์หล้า สำหรับความช่วยเหลือตั้งแต่วันที่แรกที่เริ่มโครงการ ตลอดมาจนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นายรุ่งศักดิ์ การะเกษ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการพาไปส่งไม้ที่ SCG บ้านโป่ง เพื่อให้การทำวิจัยนี้ได้ดำเนินไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินสนับสนุนโครงการเสริมประสบการณ์ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ มินยอชิตา เพื่อน ๆ ปี 4 ทุกคน พี่ ๆ น้อง ๆ ที่น่ารัก ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้

นางสาว บุญญดา นิโรจน์

นางสาว ปริญา การะเกษ

สารบัญ

สารบัญเรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 เส้นใยกระดาษ	3
2.1.1 ส่วนประกอบเส้นใย	3
2.1.2 ชนิดเส้นใย	5
2.1.3 ความแข็งแรงเส้นใย	6
2.1.4 ความแข็งแรงของการเกิดพันธะระหว่างเส้นใย	7
2.2 เส้นใยหมุน	7
2.3 การผลิตเยื่อ	8
2.4 สมบัติทางโครงสร้างของกระดาษ	9
2.5 ซีเมนต์	11
2.5.1 ความหมายและสมบัติของซีเมนต์	11
2.5.2 สารประกอบหลัก	12
2.5.3 สารประกอบรอง	13
2.5.4 การทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	14
2.6 เปเปอร์ครีต	16
2.7 วิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

บทที่ 3 การทดลอง	19
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.1.1 วัสดุดิบ	19
3.1.2 อุปกรณ์	19
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์	20
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	20
3.2.1 การเตรียมเยื่อแผ่น	20
3.2.2 การเตรียมเยื่อกระดาษ	23
3.2.3 การวิเคราะห์เส้นใยของเยื่อที่เตรียมได้	23
3.2.4 การเตรียมแผ่นทดสอบและการทดสอบแผ่นทดสอบ	24
3.2.5 การเตรียมเปเปอร์ครีตและการทดสอบสมบัติของเปเปอร์ครีต	28
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	31
4.1 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและสมบัติของเส้นใย	31
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแผ่นทดสอบ	32
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของเปเปอร์ครีต	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	37
5.1 สรุปผลการทดลอง	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	40

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเยื่อเชิงกลและเยื่อเชิงเคมีของไม้ตระกูลสน	9
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เส้นใยนุ่มและเส้นใยกระดาษ	31
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษด้วยวิธี Cobb test	32
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงของกระดาษ	33
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงฉีกของกระดาษ	33
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ	33
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเฉลี่ยของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อนุ่ม และเยื่อกระดาษที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ	34

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบเส้นใย Cellulose	3
รูปที่ 2.2 บริเวณที่เป็น crystalline และ amorphous ของเซลลูโลส	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างลิกนิน	5
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของมุมไฟบริลของผนังเซลล์ชั้น S_2	7
รูปที่ 2.5 เส้นใยนุ่ม ถ่ายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	8
รูปที่ 2.6 รูปร่างลักษณะของ C_3S และ C_2S	12
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต	15
รูปที่ 2.8 ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite	16
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง	21
รูปที่ 3.2 หม้อต้ม Pulping unit (Autoclave Digester)	22
รูปที่ 3.3 เครื่องบด Atmospheric refiner	22
รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์สภาพเส้นใย (Fiber Quality Analyzer)	23
รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ (Cobb tester)	25
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Strength)	26
รูปที่ 3.7 เครื่องต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)	27
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดันทะลุ (Bursting Strength Tester)	28
รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นเปเปอร์ครีต	28
รูปที่ 3.10 เครื่อง Compression Strength Teater	30
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตเมื่อผสมเยื่ออ่อนและเยื่อกระดาษที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ	34
รูปที่ 4.2 ผลความต้านทานแรงดัดของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่ออ่อนและเยื่อกระดาษที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกต้องเผชิญกับปัญหาสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ มากมาย ทั้งภาวะโลกร้อน การตัดไม้ทำลายป่า และการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ ซึ่งล้วนแล้วแต่สร้างผลกระทบต่อโลกและประชากรในทั่วทุกมุมโลก ปัญหาการกำจัดขยะมูลฝอยก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาเหล่านี้ จึงเกิดการนำขยะมูลฝอยมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการต่าง ๆ (Recycle) เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะมูลฝอยให้น้อยลง นอกจากนี้การรีไซเคิลยังเป็นการใช้ประโยชน์จากสิ่งของให้คุ้มค่าที่สุด และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุใหม่ รวมทั้งยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรและพลังงาน ซึ่งกระดาษเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีการนำมารีไซเคิลมากที่สุดในหลายประเทศ

กระดาษถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในสิ่งก่อสร้างมานานนับ 10 ปี โดยเฉพาะการนำมาใช้ผสมซีเมนต์เพื่อทำเป็นเปเปอร์ครีต ซึ่งมีการใช้แพร่หลายทั้งในด้านวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม โดยนำมาใช้ในการก่อสร้างบ้าน การทำเป็นเฟอร์นิเจอร์และของตกแต่งบ้านต่าง ๆ เปเปอร์ครีตนั้นเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับคอนกรีต มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และราคาถูก ผลิตโดยใช้ส่วนผสมของเยื่อกระดาษผสมกับปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ และวัสดุอื่น ๆ เช่น หิน ทราย แก้วลอย เป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยังช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนในปัจจุบันได้ [1-4]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยกระดาษประกอบไปด้วยเซลลูโลสเป็นหลัก [5] ซึ่งเซลลูโลสมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี เปเปอร์ครีตจึงมีข้อจำกัดในเรื่องความต้านทานน้ำ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับงานภายนอก ที่มีโอกาสต้องสัมผัสความชื้นเป็นเวลานาน จึงเกิดแนวคิดที่จะนำเส้นใยที่มีคุณสมบัติในการต้านทานการซึมน้ำได้ดีมาใช้แทนที่ ซึ่งนั่นถือเป็นวัสดุที่อาจตอบโจทย์ได้ เนื่องจากเส้นใยนั้นเป็นเส้นใยที่มีความหนาแน่นต่ำ ลอยตัวได้ดี ประกอบด้วยเซลลูโลส 64% ลิกนิน 13% และเพนโตซาน 23% [6] นอกจากนี้ส่วนประกอบเหล่านี้แล้วเส้นใยนั้นยังมีขี้ผึ้งคิวตินบนพื้นผิวเส้นใยซึ่งทำให้เส้นใยมีสมบัติไม่ชอบน้ำมาก (Superhydrophobic) และสามารถกันน้ำได้แม้จะมีส่วนผสมของเซลลูโลสเป็นหลักก็ตาม ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นที่จะนำตัวเส้นใยนั้นมาทดสอบคุณสมบัติเมื่อนำไปทำเป็นเปเปอร์ครีต โดยเทียบกับคุณสมบัติของเปเปอร์ครีตที่ทำจากเยื่อกระดาษทางการค้า ว่าผลที่ได้นั้นจะให้คุณสมบัติที่ต่างกันหรือเหมือนกันอย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของเส้นใยที่มีต่อสมบัติของเปเปอร์ครีตโดยเปรียบเทียบกับเส้นใยทางการค้า คือ เส้นใยสังเคราะห์เส้นใยยาว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาลักษณะสมบัติของเยื่ออ่อนและเยื่อกระดาษทางการค้า
2. ศึกษาคุณสมบัติเยื่ออ่อนและเยื่อกระดาษทางการค้าที่มีผลต่อสมบัติของเปเปอร์ครีต
3. ส่วนผสมที่มาจากเส้นใยของเปเปอร์ครีตนั้นประกอบด้วยเยื่อ 2 ชนิด คือ เยื่ออ่อนและเยื่อกระดาษทางการค้า
4. ควบคุมให้อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของเปเปอร์ครีตมีความเท่ากัน และควบคุมระยะเวลาในการผสมและการบ่ม
5. สมบัติของเปเปอร์ครีตที่ทำการทดสอบได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาตร และความทนต่อแรงดัดโค้ง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลสมบัติของเส้นใยอ่อนและสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเส้นใยอ่อน เปรียบเทียบกับสมบัติของเส้นใยกระดาษจากเยื่อทางการค้าและสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเส้นใยกระดาษจากเยื่อทางการค้า
2. ได้ข้อมูลสมบัติของเปเปอร์ครีตที่ทำจากเยื่ออ่อน เปรียบเทียบกับสมบัติของเปเปอร์ครีตที่ทำจากเยื่อกระดาษทางการค้า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

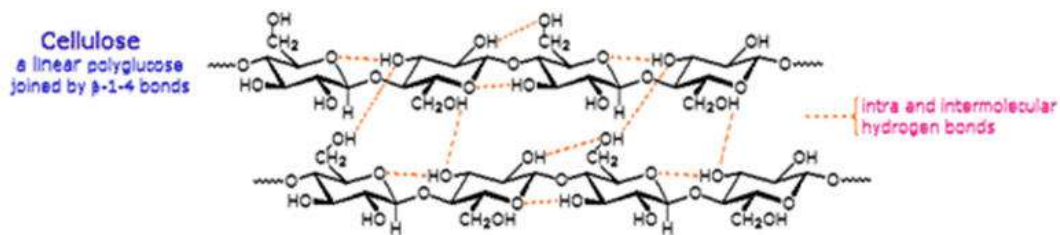
2.1 เส้นใยกระดาษ

2.1.1 ส่วนประกอบของเส้นใย

- เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 45%
- เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประมาณ 25-35%
- ลิกนิน (Lignin) ประมาณ 21-25%
- สารแทรก (Extractives) ประมาณ 2-8%

จะเห็นได้ว่า Cellulose เป็นส่วนประกอบหลักของเส้นใย รองลงมาคือ Hemicellulose โดย ส่วนประกอบหลักทั้งสองนี้รวมกันจะมีชื่อเรียกว่า “Holocellulose” (คาร์โบไฮเดรตในเส้นใย)

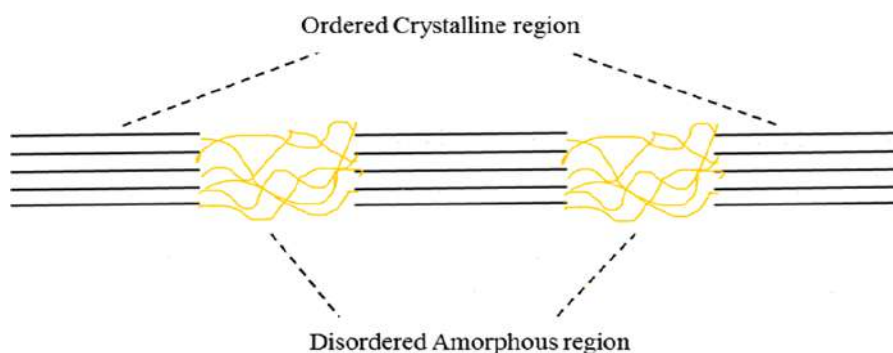
1) เซลลูโลส (Cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) คือ ประกอบด้วย C, H และ O เป็น Polysaccharide คือ เป็นพอลิเมอร์ และประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (Glucose) หลาย ๆ ยูนิตมาต่อกัน (รูปที่ 2.1) มีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ $n =$ Repeating unit หรือ Degree of polymerization (DP) โดยเฉลี่ยค่า n จะอยู่ที่ ประมาณ 600-1500 (ในบางกรณี เช่น เส้นใย ของฝ้าย ค่า n ของเซลลูโลส มีค่าถึง 5,000)



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบเส้นใย Cellulose [16]

ส่วนประกอบของเซลลูโลส มีส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วน (รูปที่ 2.2) คือ

- Crystalline region เป็นโมเลกุลของเซลลูโลสในบริเวณที่มีการจับตัวกันพอร์มพันธะเคมี Hydrogen bond อย่างเป็นระเบียบ ทำให้บริเวณนี้มีความแข็งแรง มีการต้านทานต่อตัวทำละลายหรือสารเคมีมาก ทำให้ตัวสารละลายหรือสารเคมียากที่จะซึมเข้ามาในบริเวณนี้
- Amorphous region เป็นบริเวณที่โมเลกุลของเซลลูโลสมีการจับตัวกันพอร์มพันธะเคมี Hydrogen bond แบบไม่ค่อยเป็นระเบียบ ซึ่งตรงกันข้ามกับ Crystalline region ทำให้บริเวณนี้จึงถูกทำลาย ถูก Hydrolyze ได้ง่าย (Hydrolysis reaction)

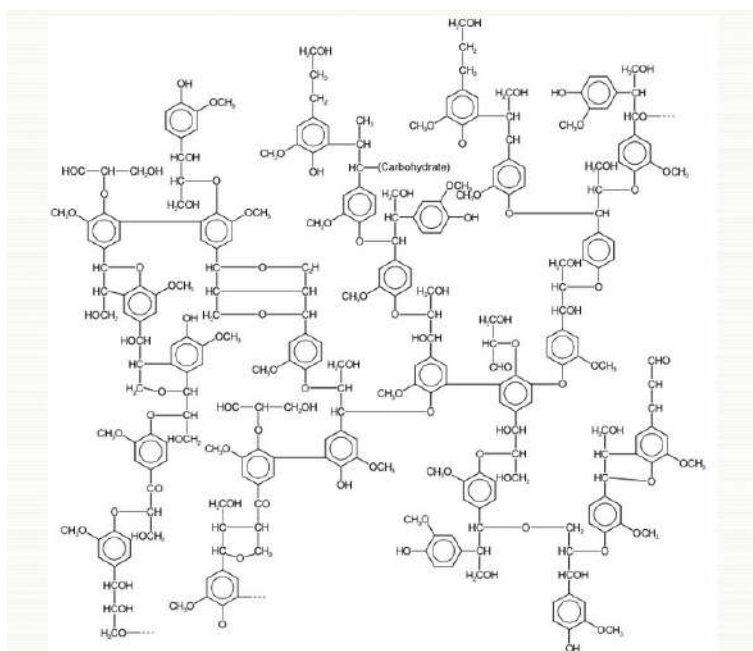


รูปที่ 2.2 บริเวณที่เป็น crystalline และ amorphous ของเซลลูโลส [17]

2) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) คือ ประกอบด้วย C, H และ O เป็น Polysaccharide คือ เป็นพอลิเมอร์ และประกอบด้วย น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลาย ๆ ชนิดมาต่อกันเหมือนกันกับ Cellulose หากแต่ส่วน Repeating unit ในที่นี่มีถึง 5 ชนิดด้วยกันในขณะที่เซลลูโลสมีเพียง Glucose ชนิดเดียวเท่านั้น โดยน้ำตาลทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ Glucose, Mannose, Galactose ซึ่งเป็นน้ำตาล C6 (Hexose) และ Xylose, Arabinose ซึ่งเป็นน้ำตาล C5 (Pentose) โดยเฉลี่ยแล้ว n หรือ DP = 100 - 200 เป็นประเภทที่มีโครงสร้างซับซ้อน และมีกิ่งก้านสาขา (Side chain) เพราะเฮมิเซลลูโลสประกอบจากน้ำตาลมากกว่า 1 ชนิด ถูกทำปฏิกิริยาได้ง่าย และถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายกว่าเซลลูโลส เพราะไม่มี Crystalline region ดังนั้นในกระบวนการผลิตเยื่อ (Pulping) ที่เป็นขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบสำหรับทำกระดาษนั้นบางส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะหายไปทำให้ผลผลิตที่ได้ลดลง

3) ลิกนิน (Lignin) เป็น Amorphous และ Highly polymerized มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์เช่นเดียวกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส แต่มี Repeating unit คือ Phenyl propane ลิกนินมีระบบโครงสร้างที่ซับซ้อน และมีอยู่มากที่บริเวณ Middle Lamella (ระหว่างเส้นใย) และมีกระจายอยู่ภายในตัวเส้นใยเองหากแต่มีปริมาณน้อย ลิกนินจะถูกเอาออกหรือทำให้อ่อนตัวลงในขั้นตอนการทำเยื่อเพราะต้องการแยกเอาเส้นใยเดี่ยว ๆ ออกมาใช้ในการผลิตกระดาษ นอกจากนี้ ลิกนินยังถูกเอาออกในขั้นตอนการฟอกเยื่อ (Bleaching) เพราะปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่มีผลต่อความเหลืองของกระดาษ เนื่องจากในลิกนินมีองค์ประกอบทางเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแสง รวมไปถึงความชื้น ทำให้เปลี่ยนสี กลายเป็นสีเหลืองขึ้นมา รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของลิกนิน

4) สารแทรก (Extractive) ซึ่งเป็นสารจำพวก Resin acid, Fatty acid, Turpenoid compound (พวกยางสน) และ Alcohol ซึ่งละลายในน้ำหรือ Neutral organic solvent เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างลิกนิน [18]

2.1.2 ชนิดของเส้นใย

ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของต้นไม้ แต่โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood)

เส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood fiber, HW) มีขนาดสั้น ทำให้นิยมเรียกเยื่อที่เตรียมมาจากไม้เนื้อแข็งว่าเยื่อใยสั้น ไม้เนื้อแข็งส่วนใหญ่เป็นพืชตระกูลไม้ผลัดใบ เช่น Gum, Maple, Oak, Eucalyptus เป็นต้น โดยทั่วไปมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างรวดเร็ว

2) ไม้เนื้ออ่อน (Softwood)

เส้นใยจากเนื้ออ่อน (Softwood fiber, SW) มีขนาดยาว ทำให้นิยมเรียกเยื่อที่เตรียมมาจากไม้เนื้ออ่อนว่าเยื่อใยยาว ไม้เนื้ออ่อนส่วนใหญ่เป็นพืชตระกูลสน เช่น Pine, Spruce, Fir, Hemlock, สนสองใบ, สนสามใบ เป็นต้น โดยทั่วไปมีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้า

ความแตกต่างระหว่าง Softwood fiber และ Hardwood fiber มีดังนี้คือ

1) ความยาวของเส้นใย (Fiber length)

Softwood fiber = 3-5 mm

Hardwood fiber = 1-2 mm

2) ความกว้างของเส้นใย (Fiber width)

Softwood fiber = 36-43 μm

Hardwood fiber = 19-22 μm

3) ความหนาของผนังเซลล์ของเส้นใย (Fiber wall thickness)

Softwood fiber = 5-11 μm

Hardwood fiber = 3-5 μm

4) ความหยาบของเส้นใย (Fiber coarseness)

ความหยาบของเส้นใย คือ น้ำหนักขององค์ประกอบของเส้นใยที่อยู่ตรงผนังเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจำเพาะ มีหน่วยเป็น mg/100 m

Softwood fiber = 15-25 mg/100 m

Hardwood fiber = 10-16 mg/100 m

5) จำนวนเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก

Softwood fiber = 1×10^6 - 2×10^6 fibers/กรัม

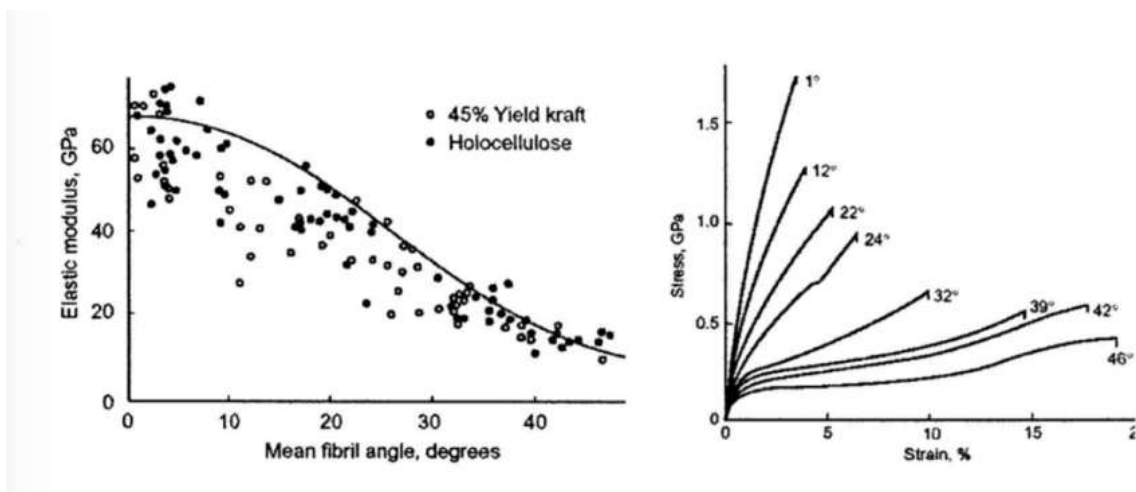
Hardwood fiber = 4×10^6 - 10×10^6 fibers/กรัม

6) สมบัติของเส้นใยที่มีผลต่อกระดาษ

Softwood fiber ให้กระดาษที่มีความแข็งแรงมากกว่า Hardwood fiber เพราะเส้นใยมีขนาดยาวกว่า จึงให้พื้นที่ในการสร้างพันธะ (Bonded area) ระหว่างเส้นใยมากกว่า อย่างไรก็ตาม Softwood fiber อาจทำให้ผิวหน้ากระดาษไม่เรียบ (Unsmooth surface) ในขณะที่ Hardwood fiber แม้ให้ความแข็งแรงได้ไม่เท่ากับ Softwood fiber แต่ให้ผิวหน้ากระดาษที่เรียบกว่า เนื่องจากเส้นใยมีขนาดสั้นกว่า นอกจากนี้ Hardwood fiber ยังให้ค่าความทึบแสงมากกว่า Softwood fiber เนื่องจาก Hardwood fiber มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการสะท้อนแสง (ซึ่งแสง) มากกว่า ทำให้แสงเดินทางไปมาอยู่ในเนื้อกระดาษนานกว่า

2.1.3 ความแข็งแรงเส้นใย (Fiber strength)

เป็นการวัดความแข็งแรงต่อการดึงของของเส้นใยแต่ละเส้นในโครงสร้างแผ่นกระดาษ ซึ่งจะขึ้นกับมุมไฟบริล (fibril angle) ของชั้น S2 ที่ทำกับแกนของเส้นใย โดยอิทธิพลของมุมไฟบริลที่มากขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งแรงของเส้นใยลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



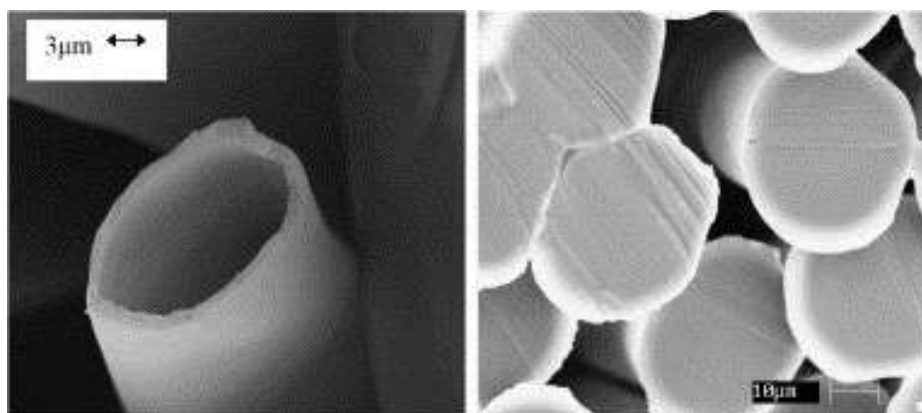
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของมุมไฟบริลของผนังเซลล์ชั้น S_2 ที่มีต่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (ซ้าย) และความแข็งแรงต่อการดึง (ขวา) [1]

2.1.4 ความแข็งแรงของการเกิดพันธะระหว่างเส้นใย (interfiber bonding strength)

ถูกควบคุมโดย 2 ปัจจัย คือ 1) ความแข็งแรงจำเพาะของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย ซึ่งมีพลังงานการเกิดพันธะอยู่ระหว่าง 8 – 32 kJ/mol และ 2) ปริมาณพื้นที่ที่เกิดพันธะระหว่างเส้นใย มักเกิดขึ้นโดยการตีเยื่อเพื่อให้เส้นใยเกิดความอ่อนตัวและสามารถแนบสัมผัสกันให้ได้มากที่สุด

2.2 เส้นใยนุ่ม

ต้นนุ่มจัดเป็นไม้ยืนต้นผลัดใบในช่วงฤดูแล้ง คือ ช่วงประมาณเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ลำต้นสูงใหญ่ตรง สูงได้ถึงประมาณ 10-30 เมตร ตรงยอดแผ่เป็นพุ่มกว้าง ลำต้นเป็นสีเขียว และมีหนามขึ้นอยู่ทั่วไปบริเวณโคนต้น ขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเมล็ด เป็นพรรณไม้กลางแจ้งที่มีถิ่นดั้งเดิมอยู่ในแถบอันดามัน และมีปลูกมากในเขตร้อนทั่วไปเพื่อใช้ปุยจากผลนำมาทำหมอนและที่นอน ชอบขึ้นตามริมลำธาร พบได้ทั่วไปตามป่าเบญจพรรณและป่าดิบเขา เส้นใยนุ่ม (รูปที่ 2.5) มีความหนาแน่นต่ำ ผิวเป็นเงา ยืดหยุ่น แต่เปราะง่าย สีของเส้นใยมีสีเหลืองอ่อน ๆ หรือสีขาว เส้นใยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและมีรูกลวง ซึ่งภายในเส้นใยมีอากาศบรรจุอยู่ เส้นใยจึงมีลักษณะเบาและลอยตัวได้ดี เซลล์ของผิวชั้นนอกและชั้นในเป็นเซลล์เดี่ยว ผิวของเส้นใยเรียบ เส้นใยไม่มีลักษณะหยิกหรือหยักที่จะช่วยให้กลุ่มเส้นใยจับตัวกัน ส่งผลให้เส้นใยไม่สามารถนำมาปั่นเป็นเส้นด้ายโดยตรง เส้นใยนุ่มประกอบด้วยเซลลูโลส 64% ลิกนิน 13% และเพนโตซาน 23% นอกจากนี้ส่วนประกอบเหล่านี้แล้วยังมีซีมีนคิวตินบนพื้นผิวเส้นใยทำให้เส้นใยนุ่มมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำมาก (Superhydrophobic) ส่งผลให้เส้นใยนุ่มสามารถกันน้ำได้แม้ว่าจะมีส่วนประกอบของเซลลูโลสเป็นหลักอยู่ก็ตาม



รูปที่ 2.5 เส้นใยพ่น ถ่ายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20]

คุณสมบัติเด่นของพ่นมีดังนี้คือ

- 1) มีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยฝ้ายถึง 5 เท่า
- 2) ลอยน้ำได้ และมีแรงต้านน้ำถึง 30 เท่าต่อน้ำหนักจริงของตัววัสดุ (หรือประมาณ 5 เท่าของแรงติดตัวในน้ำเมื่อเทียบกับวัสดุไม้ก๊อก)
- 3) เป็นฉนวนควบคุมอุณหภูมิได้ดีเยี่ยม
- 4) ไม่ดูดซับน้ำแต่สามารถซึมซับคราบน้ำมันได้เป็นอย่างดี

2.3 การผลิตเยื่อ (Pulping)

การผลิตเยื่อแบ่งออกเป็น 2 หลักการใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

1) การผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping)

เป็นการนำชิ้นไม้ไปป่นด้วยไอน้ำที่ความดันสูง จนกระทั่งถึงจุดที่เชื่อมระหว่างเซลล์เส้นใย (Middle lamella) อ่อนตัว เนื่องจากลิกนินที่อยู่ภายในเจอความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 130–150 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นไม้ไปปดด้วยเครื่องบด (Refiner) เพื่อให้เซลล์ต่าง ๆ ภายในพืชแยกออกจากกัน กระบวนการนี้ส่งผลให้เส้นใยที่ได้เกิดการฉีกขาดมาก ทำให้ได้อนุภาคเล็ก ๆ ที่เรียกว่า Fines จำนวนมาก ตัวองค์ประกอบทางเคมีมีความคงเดิม จึงทำให้เยื่อเชิงกลมีผลผลิตค่อนข้างสูง

2) การผลิตเยื่อเชิงเคมี (Chemical pulping)

เป็นการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพื่อละลายเอาลิกนินออกให้เส้นใยแยกออกจากกันได้ง่าย โดยชิ้นไม้และสารเคมีในการผลิตเยื่อจะถูกใส่ลงไปในหม้อต้มเยื่อ (Digester) ที่ความดันและอุณหภูมิสูง เส้นใยที่ได้จึงมีความสมบูรณ์สูง เกิด Fines น้อย องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีการเอาลิกนินออก ผลผลิตจึงน้อยเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อเชิงกล ตารางที่ 2.1 สรุปความแตกต่างของเยื่อเชิงกลและเยื่อเคมี

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเยื่อเชิงกลและเยื่อเชิงเคมีของไม้ตระกูลสน [2]

สมบัติ	เยื่อเชิงกล	เยื่อเชิงเคมี
ผลผลิตต่อหน่วยน้ำหนัก	มาก	น้อย
ปริมาณลิกนิน	มาก	น้อย
ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	มาก	น้อย
ระดับการเชื่อมต่อน้ำเป็นโพลีเมอร์	มากในกรณีของเซลลูโลส	มาก
ประจุเมื่อแขวนลอยในน้ำ	ประจุลบค่อนข้างมากกว่า	ประจุลบค่อนข้างน้อยกว่า
สัมพรรคภาพกับน้ำ (water affinity)	ค่อนข้างน้อย (More hydrophobic)	ค่อนข้างมาก (More hydrophillic)
เส้นใยยาวทั้งหมดต่อหน่วยน้ำหนัก	น้อย	มาก
พื้นที่ผิวจำเพาะ	มาก	น้อย
ปริมาณของ Fines (Fines content)	มาก	น้อย
ลักษณะของ Fines	เป็นแผ่น (Lamellar)	เป็นแขนงเล็กๆ (Fibrillar)
ความสามารถในการเกิดพันธะของ Fines	ดี	ดีมาก
โครงสร้างของเส้นใย	แข็งตึงสูง หยาบ และตรง	ชะลูด โค้ง และหักงอ
รูปร่างของเส้นใย	สั้น และหนา	ยาว และบาง
ความแข็งตึงต่อการวัด (Bending stiffness)	มาก	น้อย
ระดับของการยุบตัวของเส้นใย (Degree of collapse)	น้อยกว่า	มากกว่า

2.4 สมบัติทางโครงสร้างของกระดาษ

1) น้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight หรือ Grammage)

หมายถึงน้ำหนักของกระดาษต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็นกรัม/ตารางเมตร (GSM) หรือ ปอนด์ต่อรีม หรือ ปอนด์ต่อ 1000 ตารางฟุต โดยส่วนใหญ่นิยมใช้เป็น กรัม/ตารางเมตร หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า แกรม

2) ความหนา (Thickness หรือ Caliper)

หมายถึงระยะทางในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองด้านของกระดาษ วัดโดยการ ใช้ Micrometer รายงานผลในหน่วยไมโครเมตร (ระบบ SI) มิลลิเมตร นิ้ว mil หรือ point (ซึ่ง 1 mil = 1 point = 0.001 นิ้ว) (USA) ความหนาของกระดาษขึ้นกับน้ำหนักมาตรฐาน ความหนาแน่น และความชื้นภายในกระดาษ

3) ความหนาแน่น (Apparent density)

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{มวล (g)}}{\text{ปริมาตร (cm}^3\text{)}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักมาตรฐาน (g/m}^2\text{)}}{\text{ความหนา (mm)} \times 10^3}$$

ความหนาแน่นของกระดาษโดยทั่วไปอยู่ประมาณ 0.5-0.75 g/cm³ แต่ความหนาแน่นของเซลลูโลส เท่ากับ 1.5 g/cm³ แสดงว่าในแผ่นกระดาษมีอากาศอยู่อย่างน้อย 50%

$$\text{ความหนาแน่น (Density)} = \frac{1}{\text{ความฟวม (Bulk)}}$$

ความหนาแน่นของกระดาษขึ้นกับลักษณะของเส้นใย โดยผนังที่บางหรืออ่อนจะให้ความหนาแน่นสูงกว่าผนังที่หนา และยังขึ้นอยู่กับแรงกดอัดในช่วงผลิตกระดาษ

4) การกระจายตัวของเส้นใยในแผ่นกระดาษ (Formation)

Formation คือ ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยในแผ่นกระดาษ สังเกตได้จากการนำกระดาษมาส่องดูแสงที่สอดผ่าน กระดาษที่มี Formation ดี คือ มีความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษดี กระดาษที่มี Formation ที่ไม่ดีเนื้อกระดาษจะดูไม่สม่ำเสมอ เป็นจ้ำ ๆ เนื่องจากเส้นใยเกาะตัวกันเป็นกระจุก

5) ความมีทิศทางของกระดาษ (Directionality)

เกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางหนึ่งมากกว่าในอีกทิศทางหนึ่ง ขณะที่น้ำเยื่อถูกฉีดลงบนสายพานตะแกรงที่เคลื่อนที่ในช่วงขึ้นแผ่นนั้น เส้นใยจะมีการเรียงตัวในทิศทางที่สายพานวิ่ง (Machine direction หรือ MD = ตามเกรน) มากกว่าในทิศทางตามขวาง (Cross direction หรือ CD = ขวางเกรน) การที่เส้นใยมีการเรียงตัวแบบมีทิศทางเช่นนี้ ส่งผลให้กระดาษในแนว MD และ CD แตกต่างกัน เกิดเป็น Anisotropy คือการที่กระดาษมีสมบัติในสองทิศทางไม่เท่ากัน ซึ่งการจะนำไปใช้ต้องคำนึงถึงด้วย ในการหาทิศทางของกระดาษนั้น สามารถดูได้จากความโค้งงอของกระดาษ ซึ่ง CD มีมากกว่าเมื่อโดนน้ำ จากความแกร่งหรือความคงรูปของกระดาษ ซึ่ง MD > CD ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ซึ่ง MD > CD และความต้านแรงแรงฉีก ซึ่ง MD < CD

6) ความแตกต่างระหว่างสองหน้าของกระดาษ (Two-sidedness)

ในช่วงการขึ้นแผ่นกระดาษของเครื่องทำกระดาษ ผิวกระดาษด้านหนึ่งจะสัมผัสกับตะแกรงเพื่อดึงน้ำออก ซึ่งเรียกผิวกระดาษด้านนี้ว่าด้านตะแกรง (Wire side) หลังจากช่วงขึ้นแผ่นจะมีสายพานสักหลาดมารับกระดาษไปรีดน้ำต่อ จึงเรียกด้านที่ตรงข้ามกับด้านตะแกรงว่า ด้านสักหลาด (Felt side) ซึ่งด้าน Wire side จะมีเส้นใยขนาดใหญ่อยู่มากกว่า ในขณะที่พวกสารเติมแต่ง (Fillers) และเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) มักจะอยู่ด้าน

Felt side ดังนั้นผิวหน้าด้าน Wire side จะมีความหยาบกว่าด้าน Felt side อย่างไรก็ตาม ด้วยเทคโนโลยีของเครื่องผลิตกระดาษที่มีความทันสมัยมากขึ้นส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างด้าน Felt side และ Wire side มีน้อยมากในปัจจุบัน

7) ความพรุน (Porosity)

กระดาษโดยทั่วไปมีอากาศประมาณ 50% โดยปริมาตร อากาศบางส่วนอยู่ภายในเส้นใย แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างเส้นใย (รูพรุนในเนื้อกระดาษ)

$$\text{ความพรุนของกระดาษ} = \frac{\text{ปริมาตรของรูพรุนในเนื้อกระดาษ}}{\text{ปริมาตรกระดาษ}}$$

โดยปกติจะไม่มี การวัดความพรุนแบบโดยตรง แต่จะวัดความสามารถของกระดาษในการให้อากาศไหลผ่าน (Air permeability) หรือความต้านทานอากาศ (Air resistance) ซึ่ง Air permeability จะขึ้นกับจำนวนขนาดรูปร่าง ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของรูพรุนในอากาศ ดังนั้นค่าจึงไม่เหมือนกับ ความพรุนเสียทีเดียว เพราะแผ่นกระดาษที่มีรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก เมื่อเทียบกับแผ่นกระดาษที่มีรูพรุนใหญ่กว่า แต่จำนวนรูพรุนน้อยกว่า อาจมีความพรุนเท่ากัน แต่ Air permeability จะไม่เท่ากัน

8) ความเรียบ (Smoothness)

ความเรียบบ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของผิวหน้ากระดาษ ซึ่งสาเหตุของความไม่เรียบมาจากช่องว่างระหว่างเส้นใยบนผิวหน้ากระดาษ ช่องว่างระหว่างเส้นใยและสารเติมแต่งบนผิวหน้ากระดาษ รอยตะแกรง รอยสักหลาด สิ่งแปลกปลอม และความเสียหายในกระดาษ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกับความเรียบ ได้แก่ ลักษณะเส้นใย (เมื่อมีความเล็กและละเอียดจะเข้าไปอุดช่องว่างได้ดีทำให้กระดาษเรียบ) Filler (ขนาดเล็กสามารถอุดช่องว่างได้ดี) ชนิดของตะแกรงและสักหลาดที่ใช้ในเครื่องทำกระดาษ ปริมาณการรีดน้ำและขัดผิว ผิวหน้าของลูกโมบแห้ง และการเคลือบผิว

2.5 ซีเมนต์ (Cement)

ซีเมนต์เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการสร้างสิ่งก่อสร้างตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน เป็นวัสดุที่มีความนิยมน้อยแต่แพร่หลาย มีความแข็งแรงสูงและราคาไม่แพง

2.5.1 ความหมายและสมบัติของซีเมนต์

ซีเมนต์เป็นสารเคมีหรือวัสดุเซรามิกส์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคจนเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยปฏิกิริยาที่เกิดเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อาจหมายถึงสารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็งให้เกิดเป็นขึ้นเดียว ปูนซีเมนต์ที่ใช้งานทั่วไปได้มาจากธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน ดินลูกรัง ดินสอพอง และดินดำ นำมาผ่านกระบวนการเผาและบดจนได้ผงสีซีเมนต์ ในสัดส่วนที่ถูกต้องเหมาะสม

โดยอาจมีการเติมแร่เพิ่มเติม เช่น แร่เหล็ก (Iron ore) ยิปซัม (Gypsum) เป็นต้น เมื่อนำปูนซีเมนต์มาผสมกับก้อนหิน กรวด หรือทรายหยาบในสัดส่วนที่เหมาะสมจะเป็นคอนกรีต เมื่อแห้งจะมีความแข็งแรงคล้ายหิน การแข็งตัวนี้จะค่อย ๆ เป็นไป โดยแบ่งเป็นระยะแรกเริ่มแข็งตัวเรียกว่าระยะก่อตัว (Setting) และจะค่อย ๆ แข็งจนถึงระยะแข็งตัว (Hardwork)

ซีเมนต์ที่มีคุณภาพดีต้องมีการเปลี่ยนของปริมาตรในก่อนและหลังแข็งตัวที่ต่างกันมาก สำหรับซีเมนต์ที่แข็งตัวในน้ำจะมีการขยายตัวเล็กน้อย ในขณะที่เมื่อปล่อยให้แข็งตัวในที่แห้งจะหดตัว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงเค้นดึงในคอนกรีต อาจจะทำให้เกิดรอยร้าว ดังนั้น ภาพรวมของซีเมนต์ที่ดีจึงควรเริ่มแข็งตัวเมื่อมีความชื้น แข็งตัวได้ทั้งในน้ำและอากาศ สามารถรับน้ำหนักได้เต็มที่เมื่อแห้งตัว และสามารถยึดวัสดุอื่น ๆ ไว้เป็นก้อนให้เป็นชั้นเดียว

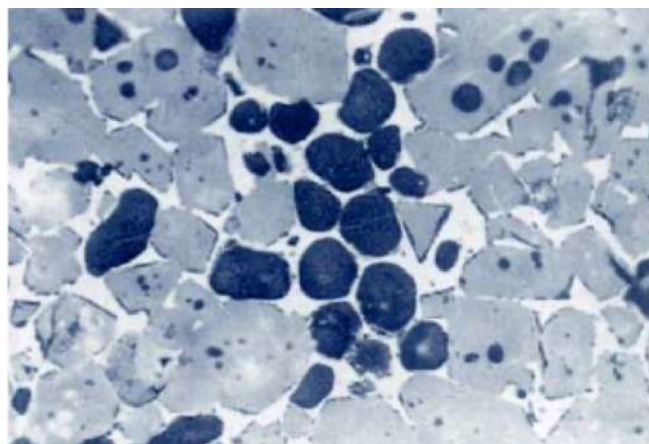
2.5.2 สารประกอบหลักของซีเมนต์

1) ไตรซิลิเคียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซัม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะมีปริมาณ 35-55%

2) ไดซิลิเคียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม (รูปที่ 2.6) โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียงแค่ βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติในการยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนา กำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ส่วนปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะอยู่ที่ 15-35%



รูปที่ 2.6 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมดำ [15]

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมากประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15%

4) เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10%

2.5.3 สารประกอบรองของซีเมนต์

1) ยิปซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

ยิปซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงสุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ซึ่งปริมาณยิปซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

1. อัลคาไลท์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และ K_2O
2. ปริมาณ C_3A
3. ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2) Free Lime (CaO)

Free lime เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

- เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3
- ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์

Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่าซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ CaO คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว โดยการขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์
 2. ขนาดของ MgO ซึ่งถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว โดยจะไม่เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว
- 4) อัลคาไลท์ออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$)
- อัลคาไลท์ออกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์นี้จะส่งผลเสียในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำให้ปฏิกิริยากับอัลคาไลท์มาผสมเป็นคอนกรีต ซึ่งผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ฉะนั้นกรณีที่ต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลท์ต่ำ

2.5.4 การทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

- 1) อาศัยสารละลาย

ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบชิ้นใหม่

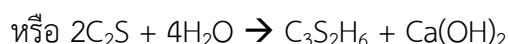
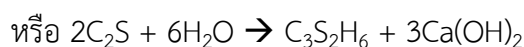
- 2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

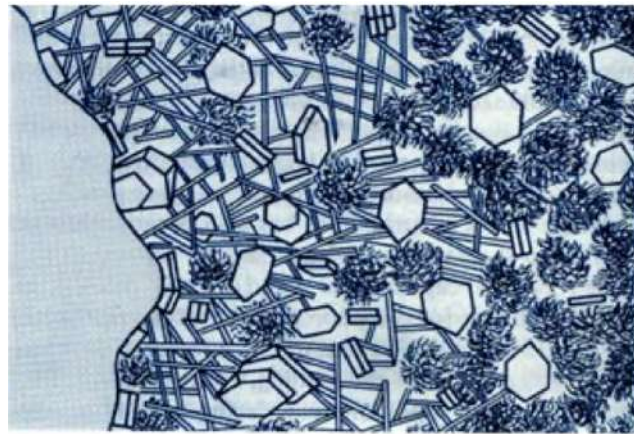
ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid state reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ตัวซีเมนต์ประกอบด้วยสารละลายหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นใหม่อาจแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภทอาจถูกแยกพิจารณาได้ดังนี้

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกต (C₃S, C₂S)

ซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด Ca(OH)_2 และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้





CSH

Ca (OH)₂

Ettringite

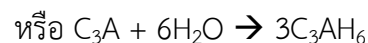
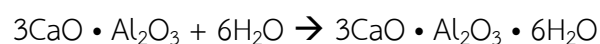
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคลเซียมซิลิเกต [15]

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

Ca(OH)₂ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

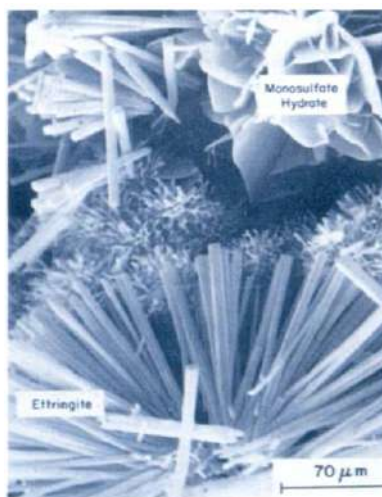


เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างกระบวนการบด ซึ่งซีเมนต์และยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C₃A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C₃A ดัง สมการ



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงเป็นการก่อดำของ C₃A และทำให้การก่อดำในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S และ C₂S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาของ C₃A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาของ C₃A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่ ซึ่งเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง โดยชั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง

Sulphate ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพขยายของ Monosulphate และ Ettringite [15]

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราคัลเซียมอลูมิเนียมเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ



2.6 เปเปอร์ครีต (Papercrete)

Papercrete เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทางอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่ทำจากกระดาษ ทราเยและปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Papercrete มีหลายแบบ โดยพื้นฐานแล้วองค์ประกอบเมื่อผสมกันในสัดส่วนที่ต่างกันส่งผลให้ Papercrete มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน Papercrete เป็นวัสดุที่ยั่งยืน สามารถช่วยลดปริมาณกระดาษที่เหลือใช้ ได้วัสดุที่มีความแข็งแรง เพราะโครงสร้างที่มีการจับตัวด้วยพันธะไฮโดรเจนถูกใช้เป็นทางเลือกที่ต้นทุนต่ำ มีความแข็งแรง ดูดซับเสียง มีน้ำหนักเบา และทนความร้อนได้ดี

องค์ประกอบพื้นฐานของ Papercrete ได้แก่

- 1) กระดาษ โดยปกติจะเป็นกระดาษเหลือใช้ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ หรือกระดาษที่ใช้แล้ว
- 2) ทราเย หิน อาจใช้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงที่ต้องการของ Papercrete

- 3) ปูนซีเมนต์ ใช้เป็นสารยึดเกาะและใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งให้กับ Papercrete
- 4) น้ำ

ประโยชน์ของ Papercrete ได้แก่

- 1) วัสดุดิบมีราคาไม่แพงมากและหาได้อย่างอิสระ
- 2) อุปกรณ์ที่ใช้มีเทคโนโลยีค่อนข้างต่ำและราคาไม่แพง
- 3) มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียงได้ดีเยี่ยม
- 4) มีน้ำหนักเบาและสามารถใช้เป็นทางเลือกในการมุงหลังคาที่มีราคาไม่แพง
- 5) สามารถใช้งานได้หลากหลายและสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่าง ๆ
- 6) ไม่ลุกเป็นไฟได้ง่าย แต่มีการเผาไหม้นานหลายชั่วโมง

ข้อจำกัดของ Papercrete ได้แก่

- 1) ทนต่อความชื้นไม่ดี
- 2) อ่อนแอต่อปลวกและเชื้อรา
- 3) สลายตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำเป็นเวลานาน
- 4) อายุการใช้งานต่ำ
- 5) ขยายตัวและหดตัวบ่อยครั้งทำให้เกิดรอยแตกและโก่ง
- 6) ความต้านทานแรงดึงต่ำ

2.7 วิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shermale และ Varma [8] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของ Papercrete โดยใช้กระดาษเป็นส่วนประกอบที่ 5%, 10% และ 15% จากนั้นนำไปทดสอบความทนแรงอัด พบว่า Papercrete ให้ความแข็งแรงที่เหมาะสมในการก่อสร้าง โดยเฉพาะการทำผนัง มีความหนาแน่นต่ำและน้ำหนักเบา หากผสมและนำไปใช้อย่างเหมาะสมสามารถใช้เป็นโครงสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้ดี

Zaki, Gorgis และ Salih [9] ได้ทำการวิจัยเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกลของ Papercrete โดยใช้กระดาษเป็นส่วนประกอบที่ 5%, 10%, 15% และ 20% เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิต Papercrete แล้วนำมาทดสอบความทนแรงอัด ความทนต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อการโค้งงอ และความหนาแน่น พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวน % เยื่อกระดาษ คุณสมบัติทางกลของ Papercrete จะลดลง ส่วนความทนต่อความร้อนและการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นไม่ควรใช้ Papercrete ในงานภายนอก เพราะว่ามี การดูดซึมน้ำมาก และสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทำ Papercrete คือ เติมเยื่อกระดาษ 20%

Keisham, Pangamam และ Shijagurumayum [10] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาสมบัติของ Papercrete โดยมีการเติมสารประกอบป้องกันการรั่วซึมของเหลว เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำของ Papercrete และยังช่วยในเรื่องความเหนียวและป้องกันการแยกตัว พบว่า Papercrete เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี และมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักหลังคาบนอาคารชั้นเดียวได้ แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องการดูดซึมน้ำ ฉะนั้นจึงไม่ควรใช้ในงานภายนอก นอกจากนี้ Papercrete ยังมีน้ำหนักค่อนข้างเบาและมีความยืดหยุ่น จึงเป็นวัสดุก่อสร้างที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

Shermale และ Varma [11] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการนำกระดาษที่ใช้แล้วมาทำเป็น Papercrete โดยในส่วนของวัสดุประกอบไปด้วย กระดาษที่เป็นวัสดุหลัก สารเติมแต่งช่วยในการกันซึม น้ำ มีการใช้ Tow mixer ซึ่งเป็นเครื่องมือราคาถูกทำง่ายช่วยทำหน้าที่ทั้งการผสมและจ่ายสาร ผลที่ได้ออกมาจากการทำทดสอบทั้งการทนแรงอัด น้ำหนัก ความหนาแน่น การทนต่อแรงดึง รวมทั้งการนำความร้อนและความเป็นฉนวนกันความร้อน พบว่า ในการทำ Papercrete นั้นยังขาดแนวทางที่ชัดเจนในการสร้าง และตัว Papercrete เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตหรือไม้ และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำ เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี รวมทั้งมีการหดตัวที่น้อยลงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Kumar และ Maheswari [12] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ Papercrete ซึ่งมีวัสดุในการสร้าง ได้แก่ Portland Cement เกรด 53 หินแกรนิตสีน้ำเงินที่บดจนมีขนาด 12.5 mm กระดาษ และน้ำ เมื่อนำไปทดสอบในด้านของการทนแรงอัดด้วยเครื่อง ใช้แรง 100 ตัน พบว่า ก้อนอิฐ Papercrete ไม่ถูกทำลายจนแตก แต่จะเป็นลักษณะคล้ายการบิบายงเมื่อถูกแรงมากกระทำ การทนต่อแรงอัด คือ 0.99 -1.12 MPa จึงสรุปว่าตัวความหนาแน่นของ Papercrete มีน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป มีน้ำหนักเบา เมื่อเกิดเหตุแผ่นดินไหวจะเป็นตัวช่วยลดความสูญเสียชีวิตได้ ในแง่ของค่าใช้จ่ายเองก็เอื้อประโยชน์ให้แก่คนจนในการสร้างบ้าน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบ

- 1) ไม้
- 2) เยื่อการค้ำแบบเยื่อไม้แข็ง (Hardwood pulp)
- 3) เยื่อการค้ำแบบเยื่อไม้ยาว (Softwood pulp)
- 4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 5) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์
- 6) ทราย
- 7) น้ำ

3.1.2 อุปกรณ์

- 1) ตู้อบ (Oven)
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิทัล
- 3) หม้อต้มระบบปิด Pulping unit (Autoclave digester)
- 4) แม่พิมพ์ไม้ ขึ้นรูปอิฐขนาด 15 เซนติเมตร x 3.5 เซนติเมตร x 3.5 เซนติเมตร
- 5) เครื่องซักผ้า
- 6) เครื่องบดเยื่อ Valley beater
- 7) เครื่องบดเยื่อแบบจานบด (Atmospheric refiner)
- 8) เครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrator)
- 9) ตู้แช่เยื่อ
- 10) ปลูกหมอน
- 11) ถังซีปล็อก
- 12) ผ้าไมโครไฟเบอร์
- 13) ถังน้ำพร้อมฝาปิด
- 14) กรรไกร
- 15) กล่องพลาสติก Tupperware
- 16) กระบอกตวง
- 17) ปีกเกอร์
- 18) ปีมสุญอากาศ

- 19) กระดาษกรอง
- 20) ขวดรูปชมพู
- 21) เครื่องวัดค่า pH (pH meter)
- 22) เครื่องขึ้นแผ่นอัตโนมัติตามมาตรฐาน ISO (Rapid Kothen sheet former)
- 23) กระดาษซับสำหรับขึ้นแผ่นทั้งแบบแผ่นใหญ่และแผ่นเล็ก
- 24) ลูกกลิ้ง
- 25) เครื่องอบ
- 26) ลูกเหล็กกลิ้ง (กว้าง 20 cm, น้ำหนัก 10 ± 0.5 Kg)

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เครื่องทดสอบสภาพระบายได้ของเยื่อ (Freeness tester)
- 2) เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) TOYOSEIKI รุ่น Strogaph Model E-S
- 3) เครื่องทดสอบแรงฉีก (Tear tester) ProTear
- 4) เครื่องวัดความหนากระดาษ
- 5) เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber quality analyzer) (FQA) Optest รุ่น LDA02
- 6) เวอร์เนียคาลิปเปอร์
- 7) เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Cobb test)
- 8) เครื่องทดสอบแรงดันทะลุ (Bursting strength tester) ยี่ห้อ PNSHER รุ่น PN-BSM160F
- 9) เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression strength tester) ยี่ห้อ Hung Ta Instrument รุ่น Ht – 8116 Tensile
- 10) เครื่องวัดความชื้น (Moisture determination balance) ยี่ห้อ Kett รุ่น FD-600

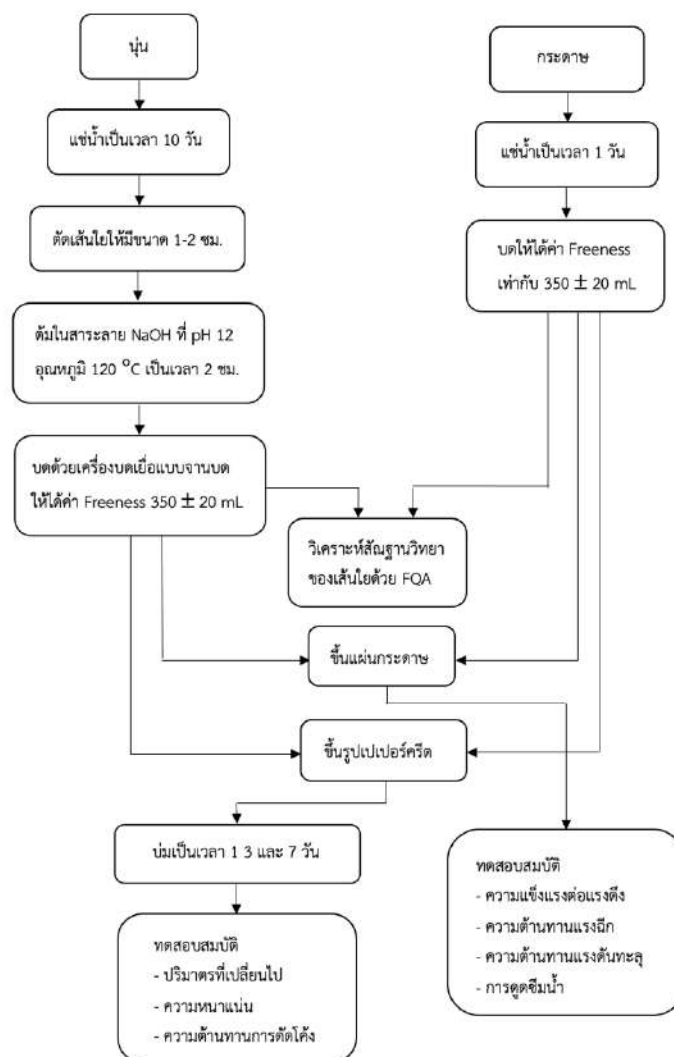
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1) การเตรียมเยื่อหรือเส้นใยนุ่น 2) การเตรียมเยื่อหรือเส้นใยกระดาษจากเยื่อทางการค้าซึ่งจะผสมกันระหว่างเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาว 3) การวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยที่เตรียมได้ทั้งจากเยื่อนุ่นและเยื่อกระดาษ 4) นำเยื่อทั้งสองชนิดไปขึ้นแผ่นทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของแผ่นทดสอบที่เตรียมได้ 5) การเตรียมเปเปอร์คริตจากเยื่อทั้งสองชนิดและวิเคราะห์สมบัติของเปเปอร์คริตที่เตรียมได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลองดังนี้ คือ

3.2.1 การเตรียมเยื่อนุ่น

- 1) นำนุ่นปริมาณ 2 กิโลกรัมไปแช่น้ำ โดยบรรจุในถังน้ำให้นุ่นทั้งหมดจมอยู่ภายใต้ น้ำแล้ว ปิดฝาเก็บไว้เป็นเวลา 10 วัน

- 2) เมื่อครบกำหนด นำนุ่นที่แช่น้ำอยู่ออกแล้วนำไปปั่นแห้งเพื่อนำน้ำบางส่วนออก จากนั้น ตัดนุ่นให้มีความยาวประมาณ 1 – 2 เซนติเมตร นำไปวัดค่าความชื้นของนุ่นด้วย เครื่องวัดความชื้น Moisture determination balance FD-600 โดยตั้งความร้อนอยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งพบว่าค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ $88.32\% \pm 1.66\%$
- 3) นำนุ่นที่ผ่านการตัดแล้ว ไปต้มในหม้อระบบปิด (Pulping unit) Autoclave digester แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยแบ่งเป็นหม้อควบคุมแรงดัน 4 หม้อ โดยแต่ละหม้อใส่เยื่อนุ่น 500 กรัม คิดเป็นน้ำหนักแห้งได้เป็น 60 กรัมต่อหม้อ จากนั้นเติมสาร NaOH 12 กรัม ซึ่งเป็น 20% ของน้ำหนักแห้งของนุ่น ใส่ น้ำจำนวน 1,500 mL แล้ววัดค่าสารละลายที่ผสมกันแล้วมีค่า pH เท่ากับ 12 เมื่อเตรียมเสร็จแล้ว ทำการปิดฝาหม้อแต่ละหม้อให้สนิท นำเข้าเครื่องที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) เมื่อต้มเสร็จแล้วนำนุ่นที่ได้ออกมาใส่ในบล็อกหมอน ปิดปากถุงให้แน่น แล้วนำไปล้างน้ำต้อออกพร้อมปั่นแห้ง จากนั้นนำเยื่อนุ่นที่ได้มาเก็บใส่ถุงซิปล็อคแล้วแช่เย็นที่อุณหภูมิ 1-5 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมความชื้นของเยื่อนุ่น



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.2 หม้อต้ม Pulping unit (Autoclave Digester) [21]

- 5) นำเยื่อหนุ่นทั้งหมดไปบดโดยใช้เครื่อง Atmospheric refiner ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งการใช้เครื่องดังกล่าวได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์พัฒนาผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยี SCG จังหวัดราชบุรี โดยบดเป็นจำนวน 2 รอบ รอบแรกระยะห่างเท่ากับ 5/1000 นิ้ว และรอบสองระยะห่างอยู่ที่ 10/1000 นิ้ว เพื่อให้ได้ค่า Freeness ประมาณ 350 ± 20 mL



รูปที่ 3.3 เครื่องบด Atmospheric refiner

3.2.2 การเตรียมเยื่อกระดาษ

- 1) หาค่าความชื้นของเยื่อกระดาษการค้ำทั้งแบบเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว ด้วยเครื่องวัดความชื้น Moisture determination balance FD-600 โดยกำหนดอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พบว่าความชื้นภายในกระดาษมีค่า 6%
- 2) เมื่อทราบค่าความชื้น เตรียมเยื่อใยสั้นให้มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 267.12 กรัม และเยื่อใยยาวให้มีน้ำหนักเท่ากับ 114.48 กรัม ซึ่งเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนเยื่อใยสั้นต่อเยื่อใยยาวแล้วจะเท่ากับ 70:30 จากนั้นฉีกเยื่อเป็นชิ้นเล็ก ๆ แช่น้ำไว้เป็นเวลา 1 วัน
- 3) นำเยื่อกระดาษที่แช่น้ำไว้แล้ว มาใส่ในเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) ใส่น้ำเข้าไปภายในเครื่องจนปริมาตรสุดท้ายได้ 23 ลิตร ทำการบดเยื่อเป็นเวลา 45 นาที เพื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (Freeness) อยู่ในช่วง 350 ± 20 mL ซึ่งค่าที่ได้ คือ 333 mL
- 4) เมื่อบดเยื่อเสร็จแล้ว นำเยื่อไปปั่นแห้งเพื่อแยกน้ำออก จากนั้นเก็บเยื่อใส่ถุงซิปล็อคแล้วแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 1-5 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมความชื้นของเยื่อกระดาษ

3.2.3 การวิเคราะห์เส้นใยของของเยื่อที่เตรียมได้

นำเยื่อที่เตรียมได้ทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber morphology) ด้วยเครื่องวิเคราะห์สภาพเส้นใย (Fiber quality analyzer: FQA) ดังแสดงในรูป 3.4 ตามมาตรฐาน ISO16065มาตรฐาน ISO 16065 การเตรียมตัวอย่างทำโดยนำเยื่อที่เตรียมได้เพียงเล็กน้อยมาผสมลงในบีกเกอร์ที่น้ำอยู่ 400 mL จากนั้นนำไปวางที่แท่นวางตัวอย่างของเครื่อง FQA ซึ่งเครื่องทำงานโดยใช้หลักการวิเคราะห์โดยเทคนิค Circular polarization ในการวัดความยาวและรูปร่างของเส้นใย และใช้การถ่ายภาพ (Single camera) ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของเส้นใยแต่ละชนิดว่ามีความต่างกันอย่างไร และส่งผลต่อสมบัติของเปเปอร์ครีตอย่างไร



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์สภาพเส้นใย (Fiber quality analyzer) (FQA)

3.2.4 การเตรียมแผ่นทดสอบและการทดสอบแผ่นทดสอบ

ทำการเตรียมแผ่นกระดาษ (แผ่นทดสอบ) จากเยื่อทั้ง 2 ชนิด จำนวนชนิดละ 5 แผ่น ก่อนนำแผ่นกระดาษที่ได้ไปทดสอบสมบัติของกระดาษ โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1 การขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet)

- 1) วัดค่าความชื้นของเยื่อด้วยเครื่องวัดค่าความชื้น จากนั้นคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษให้ได้น้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 100 g/m^2 ซึ่งจากการคำนวณพบว่าปริมาณที่เหมาะสมต่อการขึ้นแผ่นกระดาษ 1 แผ่น ของเยื่อทางการค้าเท่ากับ 628 g ส่วนเยื่อนุ่นเท่ากับ 677 g
- 2) เปิดเครื่องแผ่นอัตโนมัติ Rapid Kother sheet former รอจนหน้าจอแสดงผลขึ้นคำว่า READY ทำการเปิดฝาเครื่องใส่ตะแกรงขึ้นแผ่นลงไปให้พอดีกับฐาน แล้วปิดฝาเครื่องล็อกให้แน่น
- 3) กดปุ่ม START ให้เครื่องปล่อยน้ำออกมาจนกระทั่งถึงขีดเลข 4 ก่อนเทน้ำเยื่อที่ตวงไว้ลงไปจนหมด จากนั้นเครื่องจะทำการดูดน้ำกลับจนเหลือแค่เพียงเยื่อที่ตะแกรงเป็นแผ่น
- 4) รอจนกระทั่งหน้าจอเครื่องขึ้นคำว่า READY แล้วเปิดฝาเครื่องขึ้นแผ่นขึ้น นำกระดาษซับแผ่นใหญ่มาวางทับลงบนเยื่อ โดยให้ด้านที่มีความเรียบสำหรับกับเยื่อ แล้วนำลูกกลิ้งกลิ้งทับกลับไปมาเป็นรูปกากบาท
- 5) ยกตะแกรงออกจากเครื่อง คว่ำตะแกรงลงให้ด้านที่มีกระดาษซับอยู่ด้านล่าง เคาะให้กระดาษหลุดออก จากนั้นนำกระดาษซับแผ่นเล็กมาแปะลงอีกด้าน แล้วนำแผ่นไปอบเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเปิดฝาแล้วนำแผ่นกระดาษออก
- 6) ค่อย ๆ ลอกเอากระดาษซับทั้ง 2 ด้านออก นำกระดาษที่ได้ไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล โดยให้น้ำหนักกระดาษมีค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้อยู่ที่ $\pm 5\%$ ซึ่งจากการคำนวณน้ำหนักจะอยู่ที่ 2.983 - 3.297 g

3.2.4.2 การทดสอบแผ่นทดสอบ (Handsheet testing)

- การซึมน้ำ (Water absorptiveness)

ทดสอบการซึมน้ำของกระดาษด้วยอุปกรณ์ทดสอบการซึมน้ำ (Cobb tester) ตามมาตรฐาน TAPPI T441 (รูปที่ 3.5) โดยนำกระดาษมาตัดให้มีขนาด $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ จากนั้นชั่งน้ำหนักกระดาษก่อนทดสอบ (w_1) แล้วนำไปวางลงบนเครื่องทดสอบโดยหงายด้านที่ต้องการทดสอบขึ้น เทน้ำปริมาตร 100 mL ลงไปอย่างรวดเร็วและเริ่มจับเวลาทันที เมื่อครบเวลา 120 วินาที เทน้ำทิ้ง จากนั้นนำกระดาษออกวางบนแผ่นซับที่เตรียมไว้ ก่อนวางกระดาษซับอีกแผ่นลงไปประกบ แล้วจึงนำลูกกลิ้งกลิ้งทับกลับไปมา 1 รอบ ก่อนนำกระดาษ

ทดสอบไปข้างหน้าอีกครึ่ง (w_2) คำนวณค่าน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมในพื้นที่ 1 ตารางเมตร ภายในระยะเวลาและภาวะที่กำหนดได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{การซึมน้ำต่อหน่วยพื้นที่ } \left(\frac{g}{m^2} \right) = [w_1 - w_2] \times 100 \times 0.0645 \quad (3.1)$$

เมื่อ $w_1 =$ น้ำหนักกระดาษก่อนทดสอบ (g)

$w_2 =$ น้ำหนักกระดาษหลังทดสอบ (g)



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ (Cobb tester) [22]

- ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (รูปที่ 3.6) ตามมาตรฐาน TAPPI T494 โดยใช้ Load Cell 500 N ระยะห่างระหว่างแคมป์ตัวจับอยู่ที่ 10 cm ความเร็วที่ใช้ 25 mm/min โดยชิ้นทดสอบมีความกว้าง 1.5 cm และยาวมากกว่า 10 cm เพื่อให้มีบริเวณให้แคมป์จับ ทำการใส่ชิ้นทดสอบระหว่างแคมป์ให้กระดาษตั้ง จากนั้นกดให้เครื่องทำงาน เมื่อเครื่องทำงานเสร็จจะแสดงค่าตัวเลขของแรงที่ใช้ดึง มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และค่าระยะที่ ชิ้นทดสอบสามารถยืดได้ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ค่าที่ได้มาสามารถนำมาทำการคำนวณค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าร้อยละการยืด ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าระยะขาดได้จากสมการที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester)

$$\text{ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index, kN/m)} = \frac{\text{Force}}{\text{Width}} \quad (3.2)$$

เมื่อ Force คือ ค่าที่ได้จากการอ่านผลจากเครื่อง (N)

Width คือ ความกว้างของกระดาษ (m)

$$\text{ค่าร้อยละการยืด (Percent strength, \%)} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป}}{\text{ความยาวเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ ความยาวที่เปลี่ยนไป = ความยาวที่เพิ่มขึ้น - ความยาวเริ่มต้น

$$\text{ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index, \frac{Nm}{g})} = \frac{\text{ความแข็งแรงต่อแรงดึง}}{\text{น้ำหนักมาตรฐาน}} \quad (3.4)$$

$$\text{ค่าระยะขาด (Breaking length, m)} = \frac{10,200 \times T}{R} \quad (3.5)$$

เมื่อ T = Tensile strength (kN/m)

R = Basis weight (g/m²)

- ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)

ค่าความต้านทานแรงฉีกวัดได้จากเครื่องทดสอบแรงฉีก (Tear tester) ตามมาตรฐาน TAPPI T414 แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยตัดชิ้นทดสอบให้มี ความยาว 70 mm ความกว้าง 63 mm จากนั้นตั้งค่าเครื่องให้หน่วยที่แสดงผลเป็น mN นำชิ้นทดสอบใส่เข้าไปในเครื่องโดยให้ด้านที่ทดสอบ คือ 63 mm อยู่ในแนวตั้ง เมื่อใส่กระดาษชิ้นทดสอบแล้วจึงดึงคันโยกเพื่อยึดกระดาษไว้ จากนั้นกดปุ่ม clamp ให้ไฟที่เครื่องขึ้นคำว่า Ready แล้วจึงกดปุ่ม Test ให้เครื่องทำงาน เมื่อกระดาษขาด อ่านค่าแรงที่แสดง จากนั้นบันทึกผล นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก ตามสมการที่ 3.6

$$\text{ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index, } mN \text{ m}^2/g) = \frac{\text{Tear strength (mN)}}{\text{Basis weight (g/m}^2)} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Tear tester)

- ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength)

ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุวัดจากเครื่องวัดแรงดันทะลุ (Bursting strength tester) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ตามมาตรฐาน TAPPI T403 สำหรับการทดสอบนั้นเริ่มโดยการปรับตั้งค่าน้ำหนักของกระดาษที่นำมาทดสอบในที่นี่ คือ 100 กรัม จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ซึ่งต้องมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณที่จะทดสอบมาวางลงบนแท่น แล้วกด TEST เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน ค่าแรงดันทะลุได้มาจากแรงดันที่มากที่สุดที่ทำให้กระดาษที่ทดสอบเกิดการยืดตัวออกจนกระทั่งทะลุ มีหน่วยเป็น kPa



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดันทะลุ (Bursting strength tester)

3.2.5 การเตรียมเปเปอร์ครีตและการทดสอบสมบัติของเปเปอร์ครีต

3.2.5.1 การเตรียมเปเปอร์ครีต

- 1) ทำแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเปเปอร์ครีต ขนาด 15 cm x 3.5 cm x 3.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นเปเปอร์ครีต

- 2) นำเยื่อทางการค้าและเยื่อนุ่นที่เก็บไว้ หาค่าความชื้นซึ่งได้ค่าความชื้นเยื่อทั้ง 2 ชนิด คือ เยื่อทางการค้า 80% และเยื่อนุ่น 72%
- 3) ใช้อัตราส่วนการผสมเปเปอร์ครีตโดยอ้างอิงตามงานวิจัยที่ผ่านมา [23] คือ อัตราส่วนของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต่อทรายเป็น 0.75 : 1 อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมทั้งหมดเป็น 35% และใช้เยื่อแห้งอีก 10% ของส่วนผสมทั้งหมด แต่เนื่องจากในขั้นตอนการผสม น้ำที่อยู่ในเยื่อของกระดาษมีมากกว่าสูตรที่นำมาใช้ จึงได้ปรับสูตรให้อัตราส่วน

ทั้งหมดของเปเปอร์คริต โดยมีทรายเป็นตัวหลัก ได้อัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ต่อเยื่อแห้งต่อน้ำ เป็น 1 : 0.75 : 0.175 : 0.625 (ทราย : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ : เยื่อแห้ง : น้ำ) ตามลำดับ

- 4) ชั่งวัตถุดิบตามอัตราส่วนที่กำหนด เริ่มจากนำทรายมาผสมกับเยื่อแห้งให้เป็นเนื้อเดียว แล้วใส่น้ำลงไปผสม เมื่อเข้ากันดีแล้วจึงเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ จากนั้นผสมให้วัตถุดิบทุกอย่างเข้ากัน ทำเช่นเดียวกันกับเยื่อกระดาษทางการค้า
- 5) นำของผสมจากขั้นตอนที่แล้วมาอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่รองด้วยกระดาษไขเพื่อป้องกันการติดกับแม่พิมพ์ จากนั้นทิ้งไว้ 1 วัน เพื่อให้เปเปอร์คริตมีความคงตัว
- 6) นำเปเปอร์คริตที่แห้งแล้วออกจากแม่พิมพ์ นำไปชั่งน้ำหนัก วัดความกว้าง ความยาว และความสูงของเปเปอร์คริตด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์
- 7) นำเปเปอร์คริตมาห่อด้วยผ้าไมโครไฟเบอร์ชุบน้ำและใส่กล่องทัฟเพอร์แวร์แล้วปิดฝาเพื่อบ่มเป็น เวลา 1, 3 และ 7 วัน
- 8) เมื่อครบกำหนดวันที่บ่ม นำเปเปอร์คริตออกจากกล่องทัฟเพอร์แวร์และทิ้งไว้ให้แห้งสนิทเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก วัดความกว้าง ความยาว และความสูงอีกครั้ง
- 9) นำเปเปอร์คริตที่ได้มาทดสอบความต้านทานการตัดโค้งด้วยเครื่อง Compression strength tester

3.2.5.2 การทดสอบเปเปอร์คริต

- ความหนาแน่น

นำเปเปอร์คริตที่แห้งแล้วมาทดสอบหาความหนาแน่นรวม (Bulk density) เมื่อบ่มที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 วัน, 3 วัน และ 7 วัน ตามสมการที่ 3.7

$$\text{ความหนาแน่นรวม (Bulk density, g/mm}^3\text{)} = m/v \quad (3.7)$$

เมื่อ $m = \text{mass (g)}$

$V = \text{ปริมาตร (mm}^3\text{)}$

- ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

นำเปเปอร์คริตมาทดสอบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการใช้เครื่องเวอร์เนียคาลิเปอร์มาวัดความกว้าง ความยาว และความสูงของเปเปอร์คริต ทั้งก่อนบ่ม และหลังบ่มเมื่อก่อนเปเปอร์คริตแห้งตัวแล้ว จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาปริมาตรตามสมการที่ 3.8 เปรียบเทียบค่าที่ได้เพื่อดูความเปลี่ยนแปลง

$$\text{ปริมาตรทรงสี่เหลี่ยม (Volume, mm}^3\text{)} = \text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว} \times \text{ความสูง} \quad (3.8)$$

- ค่าความต้านทานแรงดัด (Flexural strength)

นำเปเปอร์ครีตที่ได้มาทดสอบความต้านทานการดัดด้วยเครื่อง Compression strength tester ดังแสดงในรูปที่ 3.10 สำหรับชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะเป็นทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ขนาด 15 cm x 3.5 cm x 3.5 cm จำนวน 4 ก้อนต่อหนึ่งสูตร หลักการใช้งานเครื่อง คือ นำชิ้นงานมาวางแนวนอน จากนั้นให้ Load ลงมาดันทันที่ชิ้นงานในแนวตั้งจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการหักออก เครื่องจะแสดงแรงสุดท้ายที่หน้าจอแสดงผล ซึ่งบอกได้ถึงระดับความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ นำค่าที่อ่านได้มาคำนวณตามสมการที่ 3.9

$$\text{ความต้านแรงดัด}(\sigma_f) = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.9)$$

- เมื่อ
- σ_f = ความต้านทานแรงดัด (MPa)
 - P = แรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ (N)
 - L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (mm)
 - b = ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm)
 - d = ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)



รูปที่ 3.10 เครื่อง Compression strength tester

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์สัญญาณวิทยาและสมบัติของเส้นใย

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เส้นใยนุ่นและเส้นใยกระดาษ

ลักษณะ	ค่าเฉลี่ย	
	นุ่น	กระดาษ
ความยาวเฉลี่ยของเส้นใย (mm) Average fiber length (LWW)	1.450 ± 0.0593	1.085 ± 0.0648
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก Fine percent (<75 µm) [%]	36.023 ± 0.8807	16.570 ± 0.6745
ความโค้งงอของเส้นใย Mean curl	0.086 ± 0.0015	0.120 ± 0.0045
ดัชนีความหักงอของเส้นใย Kink index	1.341 ± 0.0312	1.701 ± 0.0363
ความกว้างของเส้นใย [µm] Fiber width	14.333 ± 0.1155	22.733 ± 0.1155

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยนุ่นและเส้นใยกระดาษด้วยเครื่อง Fiber Quality Analyzer (FQA) จะเห็นได้ว่าเส้นใยนุ่นจะมีความยาวที่มากกว่าความยาวของเส้นใยกระดาษ โดยเส้นใยของนุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.957 - 1.027 มิลลิเมตร ในขณะที่เส้นใยของกระดาษมีค่าอยู่ในช่วง 0.703 - 0.759 มิลลิเมตร เส้นใยนุ่นมีปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรมากกว่าเส้นใยกระดาษ ซึ่งเส้นใยนุ่นมีปริมาณอยู่ที่ 35.14 - 36.90% ส่วนเส้นใยกระดาษมีปริมาณอยู่ที่ 15.90 - 17.24% เท่านั้น ในขณะที่เส้นใยนุ่นมีความโค้งงอและการหักงอน้อยกว่าเส้นใยกระดาษ กล่าวคือ ความโค้งงอของเส้นใยนุ่นอยู่ในช่วง 0.085 - 0.088 ในขณะที่ค่าความโค้งงอของเส้นใยกระดาษที่อยู่ในช่วง 0.116 - 0.125 ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยนุ่นอยู่ในช่วง 1.310 - 1.372 ในขณะที่เส้นใยกระดาษมีค่าอยู่ในช่วง 1.665 - 1.737 และความกว้างของเส้นใยนุ่นยังมีค่าน้อยกว่าโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 14.218 - 14.448 ไมโครเมตร ส่วนความกว้างของเส้นใยกระดาษอยู่ในช่วง 22.618 - 22.848 ไมโครเมตร แสดงให้เห็นว่า เส้นใยนุ่นมีลักษณะยาวกว่า แต่เส้นใยค่อนข้างตรง ไม่ค่อยหักหรือโค้งงอ ในขณะที่เส้นใยกระดาษนั้น แม้เส้นใยจะสั้นกว่า แต่ตัวเส้นใยมีความหักหรือโค้งงอมากกว่า แม้จะมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กน้อยกว่าก็ตาม

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแผ่นทดสอบ

- การซึมน้ำของกระดาษ (Water absorptiveness)

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษจากเยื่อปูนและเยื่อกระดาษด้วยวิธี Cobb test จะเห็นได้ว่ากระดาษจากเยื่อปูนมีการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่ากระดาษที่ทำจากเยื่อทางการค้า ค่าที่กระดาษจากเยื่อปูนดูดซึมน้ำอยู่ที่ 8.08 g/m^2 ส่วนของกระดาษที่ทำจากเยื่อทางการค้านั้นมีค่าอยู่ที่ 12.22 g/m^2 ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยปูนมีซี่ฝั้งคิวดินเคลือบผิวเส้นใยด้านนอกอยู่ ทำให้เส้นใยปูนมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำมาก (Superhydrophobic) อีกทั้งกระดาษจากเยื่อปูนมีปริมาณของเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร อยู่ในปริมาณมาก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเมื่อทำการขึ้นแผ่นกระดาษเส้นใยขนาดเล็ก ๆ เหล่านี้อาจไปอุดที่ช่องว่างระหว่างเส้นใยทำให้ผิวหน้าของกระดาษที่ทำจากปูนมีความพรุนน้อยลง น้ำจึงเข้าสู่ภายในกระดาษน้อยลง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษด้วยวิธี Cobb test

สมบัติ	ปูน	กระดาษ
น้ำหนักของกระดาษก่อนทดสอบ (g)	1.62 ± 0.007	1.59 ± 0.007
น้ำหนักของกระดาษหลังทดสอบ (g)	2.87 ± 0.023	3.49 ± 0.042
ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (g/m^2)	8.08 ± 3.111	12.22 ± 5.728

- ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

จากการพิจารณาผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่ากระดาษที่ทำจากเยื่อปูนมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากระดาษที่ทำจากเยื่อทางการค้า โดยค่าที่ได้ของกระดาษจากเยื่อปูนมีค่าอยู่ที่ 9.71 kN/m ส่วนกระดาษจากเยื่อทางการค้ามีค่าเท่ากับ 5.73 kN/m สาเหตุเนื่องมาจากความแข็งแรงต่อนั้นขึ้นกับพันธะระหว่างเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใย และความยาวของเส้นใย ซึ่งเส้นใยปูนมีความยาวมากกว่าเส้นใยกระดาษ อีกทั้งความโค้งและการหักงอของเส้นใยปูนยังมีน้อยกว่าเส้นใยกระดาษ ส่งผลให้แรงที่ใช้ในการดึงให้กระดาษขาดออกจากกันต้องใช้แรงที่มากกว่าการดึงกระดาษที่เตรียมจากเส้นใยทางการค้า แต่เมื่อพิจารณาดูในค่าของระยะยืด ตัวกระดาษของเยื่อปูนมีค่าที่ต่ำกว่ากระดาษจากเยื่อทางการค้า โดยระยะยืดของกระดาษเยื่อปูนมีค่า 2.80 mm ในขณะที่กระดาษจากเยื่อทางการค้ามีค่า 4.20 mm แสดงว่าเส้นใยของปูนนั้นมีความสามารถในการยืดที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับเส้นใยทางการค้า

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

สมบัติ	นุ่น	กระดาษ
แรง (Tensile : N)	145.70 ± 4.07	85.95 ± 5.53
ระยะยืด (mm)	2.80 ± 0.14	4.20 ± 0.33
ความแข็งแรงต่อแรงดึง (kN/m)	9.71 ± 0.27	5.73 ± 0.37
ร้อยละการยืดตัว (%)	2.80 ± 0.14	4.20 ± 0.33
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	98.13 ± 2.72	57.33 ± 3.69
ค่าระยะขาด (m)	9731.93 ± 113.94	5743.97 ± 369.73

- ความต้านแรงฉีก (Tear resistance)

ผลจากการวัดความต้านแรงฉีกดังแสดงในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่ากระดาษจากเยื่ออ่อนใช้แรงอยู่ที่ 266.741 mN ซึ่งน้อยกว่ากระดาษจากเยื่อกระดาษทางการค้าที่ใช้แรงอยู่ 974.781 mN ในส่วนของความต้านแรงฉีกนั้นเม้นพื้นระหว่างเส้นใยจะมีผลต่อความต้านทานแรงฉีก แต่ความยาวและความแข็งแรงของเส้นใยจะมีผลมากกว่า แต่ถ้าดูจากความยาวของเส้นใยผลที่ได้นั้นไม่สอดคล้องกับส่วนของทฤษฎีเพราะเส้นใยอ่อนมีความยาวมากกว่าเส้นใยกระดาษทางการค้า แต่แรงต้านทานการฉีกกลับมีน้อยกว่า ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่คุณสมบัติของเส้นใยอ่อนมีความเปราะ ไม่ทนต่อแรงที่มากกระทำในแนวตั้งฉากกับเส้นใย ทำให้เส้นใยอ่อนเม้นจะยาวกว่า มีความแข็งแรงมากกว่า หากแต่มีความเปราะบางกว่าเส้นใยจากเยื่อกระดาษทางการค้า จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่เตรียมจากเส้นใยอ่อนมีค่าต่ำกว่า

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงฉีกของกระดาษ

สมบัติ	นุ่น	กระดาษ
Tear Resistance (mN)	266.741 ± 13.961	974.781 ± 54.964
Tear Index (mN m ² /g)	2.767 ± 0.167	9.748 ± 0.550

- ความทนต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength)

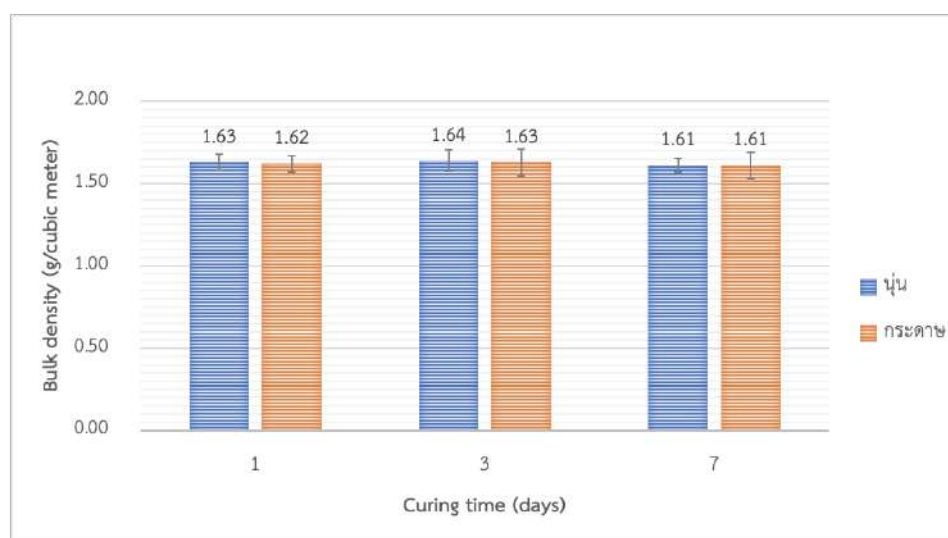
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ

สมบัติ	นุ่น	กระดาษ
Bursting strength (kPa)	443.40 ± 21.80	392.90 ± 33.80

จากตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับความแข็งแรงต่อแรงดึงที่แสดงในตารางที่ 4.3 นั่นคือ กระจกที่ทำจากเยื่ออ่อนมีความทนต่อแรงดันทะลุมากกว่ากระจกที่ทำจากเยื่อกระจกทางการค้า ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยอ่อนยาวกว่า และมีความแข็งแรงที่มากกว่าเส้นใยกระจกทางการค้า

4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของเปเปอร์ครีต

- ความหนาแน่น (Bulk density)



รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตเมื่อผสมเยื่ออ่อนและเยื่อกระจกที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ รวมถึงชนิดของเยื่อมีผลต่อความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตน้อยมาก ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากระยะเวลาในการบ่มยังไม่ก่อให้เกิดผลที่เห็นได้ชัดเจน อีกทั้งเปเปอร์ครีตที่เตรียมจากเยื่อทั้งสองชนิดยังถูกผสมด้วยอัตราส่วนที่เท่ากัน นอกจากนี้ น้ำหนักและความหนาแน่นของเส้นใยเองก็ไม่แตกต่างกันมาก จึงอาจเป็นผลให้ความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่เตรียมได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

- ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

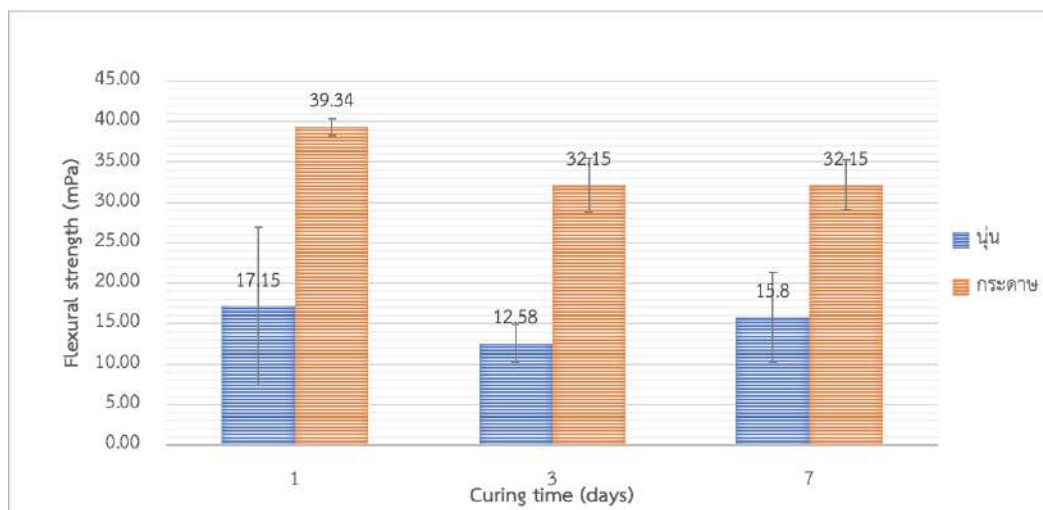
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่ออ่อนและเยื่อกระจกที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ

Curing time (days)	เยื่ออ่อน	กระจก
1	7.99 ± 3.06	8.65 ± 3.44
3	7.42 ± 2.17	8.84 ± 2.69
7	7.74 ± 2.96	8.83 ± 0.92

จากตารางที่ 4.6 ที่แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในแต่ละช่วงของระยะเวลาบ่มของเยื่อทั้งสองชนิด พบว่าปริมาตรที่เปลี่ยนไปมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าระยะเวลาในการบ่มจะต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยพบว่า เปเปอร์ครีตที่ใช้เส้นใยกระดาษทางการค้าให้ปริมาตรที่เปลี่ยนไปมากกว่าเปเปอร์ครีตที่ทำจากเยื่อหนุ่น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเยื่อกระดาษนั้นมีความชอบน้ำมากกว่าเยื่อหนุ่น เมื่อนำเปเปอร์ครีตที่ทำจากเยื่อกระดาษไปทำการบ่ม เยื่อกระดาษที่อยู่ภายในเปเปอร์ครีตจะทำการดูดน้ำเข้าไปเก็บไว้ เมื่อครบกำหนดการบ่มในแต่ละช่วงเวลา เปเปอร์ครีตถูกนำออกมาเจออากาศ น้ำที่อยู่ในบริเวณที่เป็นคอนกรีตก็จะระเหยออกไป แต่เนื่องจากภายในเยื่อกระดาษที่อยู่ภายในเปเปอร์ครีตยังมีการดูดซับน้ำอยู่ ส่งผลให้ชิ้นงานยังมีการบวมตัวอยู่ในขณะที่เปเปอร์ครีตที่ทำจากเยื่อหนุ่นมีการบวมตัวน้อยกว่า อาจมีสาเหตุมาจากการที่เส้นใยหนุ่นมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำเนื่องจากเส้นใยหนุ่นมีควิตินเคลือบผิวอยู่ ทำให้ดูดซับน้ำที่มาจากกำบ่มน้อยไปด้วย ผลที่ได้จึงมีความแตกต่างกัน

- **ความต้านทานแรงดัด (Flexural strength)**

จากรูปที่ 4.2 ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 1 วัน มีความต้านทานในแรงดัดที่มากที่สุด ส่วนในระยะเวลาการบ่มที่ 3 และ 7 วัน มีความต้านทานแรงดัดที่น้อยกว่าและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าเมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้นความแข็งแรงของเปเปอร์ครีตก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของซีเมนต์แข็งแรงขึ้น เพราะน้ำที่มีในการบ่มจะถูกดูดซับเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ภายในเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกต (CSH) เป็นตัวทำให้อช่องว่างระหว่างทรายกับปูนหายไป ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้เวลาให้เกิดการขยายตัวจนอุดช่องว่างระหว่างทรายกับปูน และยังมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ซีเมนต์เฟสท์ (CH) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงเป็นผลึกที่ล้อมรอบทรายในชิ้นงาน รวมทั้งยังมีสารแคลเซียมซิลิโพลูมินเนตที่เกิดขึ้นทันทีเมื่อเริ่มผสมปูนกับน้ำ โครงสร้างทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นตัวช่วยให้ความแข็งแรงสำหรับซีเมนต์เมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ โดยสาเหตุมีโอกาสที่จะเกิดจากระยะเวลาการบ่มที่น้อยเกินไปจนทำให้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเห็นได้ไม่ชัด



รูปที่ 4.2 ผลความต้านทานแรงดัดของเปเปอร์คริตที่ผสมเยื่ออนุและเยื่อกระดาษที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาระหว่างเยื่อทั้งสองที่นำมาใช้ เปเปอร์คริตจากเยื่อกระดาษมีความต้านทานแรงดัดมากกว่าเปเปอร์คริตจากเยื่ออนุ เปเปอร์คริตจากเยื่อกระดาษ ความต้านทานแรงดัดที่เวลาบ่ม 1 วัน มีค่า 39.335 kgf/cm² ที่เวลาบ่ม 3 วัน มีค่า 32.153 kgf/cm² ที่เวลาบ่ม 7 วัน มีค่า 32.153 kgf/cm² ส่วนเปเปอร์คริตที่ทำจากเยื่ออนุ ความต้านทานแรงดัดที่เวลาบ่ม 1 วัน มีค่า 17.146 kgf/cm² ที่เวลาบ่ม 3 วัน มีค่า 12.582 kgf/cm² ที่เวลาบ่ม 7 วัน มีค่า 15.795 kgf/cm² สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเปเปอร์คริตที่ทำจากเยื่อกระดาษ มีความสามารถในการเข้ากับคอนกรีตได้ดีกว่าเปเปอร์คริตที่ทำจากเยื่ออนุ ถึงแม้ว่าเยื่อกระดาษมีการดูดซับน้ำได้ดี จนไปแย่งเอาน้ำจากส่วนที่ไปทำปฏิกิริยากับปูน แต่เมื่อหยุดการบ่มและปล่อยให้ชิ้นงานแห้ง เยื่อกระดาษนี้ก็ช่วยให้ น้ำกับปูนบริเวณรอบ ๆ ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่บริเวณที่มี Interface กัน ดังนั้นเมื่อนำไปทำการทดสอบที่มีแรงมากกระทำเป็นแรงตั้งฉาก การทำให้เกิดการหักงอต้องผ่านชั้นที่เป็นคอนกรีตก่อน จากนั้นจึงไปถึงช่วงที่มีการ interface กันอยู่ แล้วจึงทำลายเส้นใย แต่กับเปเปอร์คริตที่ทำจากเยื่ออนุ ที่ควรมีความแข็งแรงมากกว่าเนื่องจากเส้นใยไม่ชอบน้ำ ทำให้ไม่ดูดซับน้ำที่มาจาก การบ่มเท่าที่กระดาษดูดซับ และน้ำนั้นไปทำปฏิกิริยากับปูนจนเกิดความแข็งแรง แต่กลับกันเมื่อนำไปทำการทดสอบความต้านทานแรงดัดกับมีน้อยกว่า เพราะความแข็งแรงที่เป็นตัวต้านทานมีแค่ที่บริเวณคอนกรีต และส่วนที่เป็นเส้นใยของอนุ ส่วนในบริเวณที่เป็น interface กันระหว่างคอนกรีตกับเยื่ออนุ ไม่มีความเข้ากัน ก่อให้เกิดความขรุขระขึ้น เกิดฟองอากาศทำให้มีรอยแตกร้าว แรงที่ใช้ต้านทานจึงมีน้อยกว่าที่ใช้เยื่อกระดาษผสม

จากงานวิจัยนี้จึงพอสรุปเบื้องต้นได้ว่าเยื่ออนุที่มีความแข็งแรงในแนวของเส้นใยสูง และในหมู่เส้นใยอนุด้วยกันก่อพันธะให้ความแข็งแรงที่ดี ถึงแม้จะมีความเปราะเมื่อมีแรงมากกระทำในแนวตั้งฉาก แต่เมื่อนำมาทดลองผสมรวมกับคอนกรีตเพื่อทำเปเปอร์คริตแล้วกลับให้ผลไม่ดีเท่ากับที่ตั้งสมมติฐานไว้ในตอนต้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. เยื่อนุ่นมีความยาวของเส้นใยมากกว่า แต่มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากกว่าเยื่อกระดาษทางการค้า ส่งผลให้เยื่อนุ่นมีความแข็งแรงตึงและความแข็งแรงด้นทะลุมากกว่า แต่เนื่องจากเส้นใยมีความเปราะ ทำให้มีความต้านทานแรงฉีกน้อยกว่าเยื่อกระดาษทางการค้า
2. เยื่อนุ่นดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าเยื่อกระดาษทางการค้า เนื่องจากซีฟิ่งควิตินที่เคลือบอยู่ที่บริเวณผิวของเส้นใย ทำใหุ้่นมีสมบัติไม่ชอบน้ำมาก (Superhydrophobic)
3. อัตราส่วนของส่วนผสมเปเปอร์คริตมีผลต่อความหนาแน่น เมื่อผสมด้วยอัตราส่วนที่เท่ากัน ส่งผลให้เปเปอร์คริตทั้ง 2 ชนิดมีความหนาแน่นไม่ต่างกัน
4. ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเปเปอร์คริต คือ ตัวประสาน (interface) ระหว่างส่วนผสมทั้งหมดของเปเปอร์คริต
5. เปเปอร์คริตที่ผลิตจากเยื่อกระดาษทางการค้าเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานมากกว่าเปเปอร์คริตจากเยื่อนุ่น เนื่องจากมีความแข็งแรง และส่วนผสมเข้ากันได้ดี ทำให้เปเปอร์คริตมีความเรียบเนียน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควบคุมความชื้นขณะบ่มให้มีค่าใกล้เคียงกันทุกชิ้นงาน
2. ทดลองบ่มโดยใช้เวลามากขึ้น เป็น 14 วัน หรือ 28 วัน
3. ทดลองเติมสารที่ช่วยในการรวมตัวกันของส่วนผสม เพื่อทดสอบว่าสามารถช่วยใหุ้่นรวมตัวกับส่วนผสมอื่น ๆ ได้หรือไม่
4. ทดลองแช่น้ำเปเปอร์คริตที่ผลิตจากเยื่อทั้ง 2 ชนิด เพื่อทดสอบการซึมน้ำของเปเปอร์คริต

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมหวัง ชัตยานวงศ์. (2551). เส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใย. เส้นใยเยื่อและกระดาษ: สมบัติทางกายภาพ (น. 18-39). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2563. จาก <https://ebook.lib.ku.ac.th/ebook27/ebook/20150061/>
- [2] สมพร ชัยอารีย์กิจ. (2562). การผลิตเยื่อกระดาษ (Palping). เอกสารประกอบการเรียน-การสอน วิชา 2313335 เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ปี 2562
- [3] สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. (2557). นุ่น. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2563. จาก https://arit.kpru.ac.th/ap2/local/?nu=pages&page_id=1641&code_db=610010&code_type=01
- [4] วิฬารินทร์ ตั้งดี. (2557). เส้นใยนุ่น. การศึกษาการดูดซับเสียงของผ้าไม่ทอจากเส้นใยพอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยนุ่น. (น. 15-20). มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2563. จาก <http://www.repository.rmutt.ac.th/bitstream/handle/123456789/2442/RMUTT-106589.pdf?sequence=1>
- [5] โรงนุ่นโซคสุชัย. (2556). คุณสมบัติพิเศษของนุ่น. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2563. จาก <https://www.puinoon.com/คุณสมบัติพิเศษของนุ่น>
- [6] ฤดี นิยมรัตน์. (2556). ซีเมนต์. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2563. จาก http://www.elfit.ssr.u.ac.th/reudee_ni/file.php/1/CeramicTechnology/c2-cement.pdf
- [7] Neenu Arjun. What is papercrete? สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2563. จาก <https://theconstructor.org/concrete/papercrete/1961/?fbclid=IwAR2NslMe4g7Rb7Kb-m0xnnjBFqcOJvL8TFNrsd3jLp0PttvhY2FvT1d2oo>
- [8] Shermale, Y. and Varma, M.B., "Paper Crete: A lightweight concrete", <https://www.researchgate.net/publication/320757368>, สืบค้นเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2563
- [9] Gorgis, I. Salih, S. and Zaki, H., "Mechanical Properties of Papercrete", <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816202016>, สืบค้นเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2563
- [10] Keisham, K. Pangamam, A. and Shijagurumayum, C., "A Review on Papercrete", International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, 5(3), ISSN: 2349 – 4476, 2017
- [11] Shermale, Y. and Varma, M.B., "Papercrete: An Efficient Use of waste Paper", Recent Trends in Civil Engineering & Technology, 5(3), ISSN: 2321 – 6476, 2015

- [12] Kumar, M.M. and Maheshwari, G.U., “Papercrete”, International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 6(8), ISSN: 2278 – 7798, 2017
- [13] กุณทีนี สุวรรณกิจ. (2562). สมบัติกระดาษ (Paper Properties). เอกสารประกอบการเรียน-การสอน วิชา 2313335 เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ปี 2562
- [14] บริษัท ดับเบิล เอ (1991) จำกัด (มหาชน). กระบวนการผลิต. สืบค้นเมื่อ วันที่ 25 พฤษภาคม 2564. จาก <http://market.sec.or.th/public/ipos/IPOSGetFile.aspx?TransID=76856&TransFileSeq=8>
- [15] The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. บทที่ 2 ปูนซีเมนต์. สืบค้นเมื่อ วันที่ 29 พฤษภาคม 2564. จาก https://cpacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech%20u2.pdf
- [16] Y.-H. Percival Zhang. (2018). *Recalcitrant lignocellulose structure containing cellulose, hemicellulose, and lignin*. [image]. Retrieved November 1, 2020, from https://www.researchgate.net/figure/Recalcitrant-lignocellulose-structure-containing-cellulose-hemicellulose-and-lignin_fig1_5669308
- [17] Malladi, R. (2018)*Crystalline and amorphous regions of cellulose*. [image]. Retrieved November 1, 2020, from https://www.researchgate.net/publication/328114444_Crystalline_and_amorphous_regions_of_cellulose/figure/fig1/figure-pdf/5d0000000000000000000000/figure-pdf/urand-Industrial-Waste-in-the-Field-of-Nanocellulose-and-Recent-Industrial-Developments-of-Wood-Based-Nanocellulose-A-Review/figures?lo=1
- [18] Glazer, A. W., and Nikaido, H. (1995). *Microbial Biotechnology: fundamentals of applied microbiology*. San Francisco: W. H. Freeman, p. 340. ISBN 0-71672608-4.
- [20] Abdullah, M. A. Rahmah, A. U. and Man, Z. (2010). *SEM images of Kapok fiber*. [image]. Retrieved November 2, 2019, from https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-kapok-fiber_fig1_40898390
- [21] Alat Uji. (2016). *Pulping Unit (Autoclave Digester)*. [image] Retrieved May 25, 2021, from <https://www.alatuji.com/m/detail/294/951/pulping-unit-autoclave-digester>
- [22] Gurley Precison Instrument. (2021). *Cobb Method Testing Apparatus* [image] Retrieved May 25, 2021, from <https://www.unitload.vt.edu/facilities/corrugated-packaging-lab/water-absorption-testing.html>
- [23] วิภาวี เข้มเฉลิม และ อารีญา จันทร์บาง. (2562). *การใช้กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ในวัสดุเชิงประกอบ (The use of toner-printed and label paper wastes in papercrete composites)*. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาคผนวก ก
ค่าการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใย

ตารางที่ ก.1 ค่าการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยนุ่นและเส้นใยกระดาษทางการค้า

สมบัติของเส้นใย	ค่าเฉลี่ย	
	นุ่น	กระดาษ
Average fiber length (LN) [mm]	0.643 ± 0.0140	0.569 ± 0.0015
Length weighted average fiber length (LW) [mm]	0.992 ± 0.0352	0.731 ± 0.0276
Weight weighted average fiber length (LWW) [mm]	1.450 ± 0.0593	1.085 ± 0.0648
Fine percent (<75 μm) [%]	36.023 ± 0.8807	16.570 ± 0.6745
Mean curl	0.086 ± 0.0015	0.120 ± 0.0045
Kink index	1.341 ± 0.0312	1.701 ± 0.0363
Fiber width [μm]	14.333 ± 0.1155	22.733 ± 0.1155

ภาคผนวก ข
ค่า Freeness ของแผ่น Handsheet

ตาราง ข.1 ค่า Freeness ของแผ่น Handsheet ที่ผลิตจากเยื่อกระดาษทางการค้าที่เวลาบดต่าง ๆ กัน

เวลาบดเยื่อ (นาที)	ปริมาตรน้ำที่อ่านได้ (mL)	อุณหภูมิน้ำ (c)	น้ำหนักเยื่อแห้ง (กรัม)	% ความเข้มข้นเยื่อ	ค่าแก้ไขจากอุณหภูมิ	ค่าแก้ไขจากความเข้มข้นเยื่อ	ค่า Freeness (mL)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)
0	690	28	2.958	0.296	-26.5	-5	658.5	1.391
15	650	28	2.669	0.267	-28.5	-17.5	604.0	1.446
35	470	28	2.729	0.273	-34.5	-21	414.5	1.462
40	440	28	2.716	0.272	-36	-21	383.0	1.413
45	390	28	2.734	0.273	-36	-21	333.0	1.396

ภาคผนวก ค
น้ำหนักมาตรฐานของแผ่น Handsheet

ตาราง ค.1 น้ำหนักมาตรฐานของแผ่น Handsheet ที่ผลิตจากเยื่อไม้และเยื่อกระดาษทางการค้า

ชนิดเยื่อ	ปริมาณน้ำเยื่อที่ตกเพื่อขึ้นแผ่น (g)	น้ำหนักเยื่อแห้งที่ได้จากการขึ้นแผ่น (g)							น้ำหนักมาตรฐาน (gram)
		แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	แผ่นที่ 4	แผ่นที่ 5	แผ่นที่ 6	เฉลี่ย	
ไม้	628	3.140	3.075	3.225	3.078	3.150	3.167	3.1319	99.74
กระดาษ	677	3.228	3.069	3.142	3.082	3.152	2.952	3.1042	98.86

ภาคผนวก ง
ค่าการซึมน้ำของแผ่น Handsheet

ตาราง ง.1 ค่าการทดสอบการซึมน้ำของแผ่น Handsheet ที่ผลิตจากเยื่อไม้และเยื่อกระดาษทางการค้า

ชนิดเยื่อ	แผ่นที่	น้ำหนักเริ่มต้น (g)	น้ำหนักสุดท้าย (g)	น้ำหนักของน้ำ (g)	ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษ (g/m ²)	เฉลี่ย
ไม้	1	1.626	2.856	1.230	7.93	8.08
	2	1.615	2.889	1.274	8.22	
กระดาษ	1	1.594	3.458	1.854	11.96	12.22
	2	1.583	3.518	1.935	12.48	

ภาคผนวก จ

ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ตาราง จ.1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ของแผ่น Handsheet ที่ผลิตจากเยื่ออ่อนและเยื่อกระดาษทางการค้า เมื่อกำหนด Load Cell 500 N ระยะห่างระหว่าง Clamp 10 cm

ชนิดเยื่อ	แผ่นที่	แรง (Tensile : N)	ระยะ ยืด (mm)	Tensile Strength (kN/m)	Percent Stretch (%)	Tensile Index (Nm/g)	Breaking Length (m)
อ่อน	1	148.20	2.8	9.88	2.8	98.80	9899.76
	2	149.00	2.6	9.93	2.6	99.30	9949.86
	3	145.60	2.8	9.71	2.8	97.10	9729.42
	4	140.00	3.0	9.33	3.0	93.30	9348.66
	เฉลี่ย	145.70	2.8	9.71	2.8	98.13	9731.93
กระดาษ	1	94.00	4.6	6.27	4.6	62.70	6282.54
	2	84.40	4.5	5.63	4.5	56.30	5641.26
	3	84.00	4.0	5.60	4.0	56.00	5611.20
	4	81.40	3.8	5.43	3.8	54.30	5440.86
	เฉลี่ย	85.95	4.2	5.73	4.2	57.33	5743.97

ภาคผนวก ฉ
ค่าความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)

ตารางที่ ฉ.1 ค่าความต้านทานแรงฉีกของแผ่น Handsheet ที่ผลิตจากเยื่ออ่อนและเยื่อกระดาษทางการค้า

ชนิดเยื่อ	แผ่นที่	Tear Resistance (mN)	Tear Index (mN m ² /g)
อ่อน	1	286.354	2.8635
	2	258.896	2.5890
	3	266.741	2.6674
	4	254.973	2.9473
	เฉลี่ย	266.741	2.7668
กระดาษ	1	1008.120	10.0812
	2	984.588	9.8459
	3	894.366	8.9437
	4	1012.050	10.1205
	เฉลี่ย	974.781	9.7478

ภาคผนวก ข
ค่าความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting strength)

ตารางที่ ข.1 ค่าความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting strength) ของแผ่น Handsheet ที่ผลิตจากเยื่อหนุ่นและเยื่อกระดาษทางการค้า

ชนิดเยื่อ	แผ่นที่	Bursting strength (kPa)
หนุ่น	1	450.05
	2	439.45
	3	468.90
	4	415.20
	เฉลี่ย	443.40
กระดาษ	1	389.45
	2	358.30
	3	426.40
	4	397.55
	เฉลี่ย	392.93

ภาคผนวก ซ
ปริมาตรและความหนาแน่น

ตารางที่ ซ.1 ปริมาตรและความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนทำการบ่ม

ชนิดเยื่อ	ชุดที่	ชั้นงานที่	ขนาด			น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
			ความยาว (cm)	ความหนา (cm)	ความกว้าง (cm)			
นุ่น	1	1	15.10	3.50	3.10	242.96	163.84	1.48
		2	15.10	3.25	3.10	247.21	152.13	1.62
		3	15.10	3.50	3.00	247.49	158.55	1.56
		4	15.10	3.45	3.20	244.30	166.70	1.47
		เฉลี่ย	15.10	3.43	3.10	245.49	160.31	1.54
	2	1	15.10	3.55	3.15	253.44	168.86	1.50
		2	15.10	3.55	3.20	253.16	171.54	1.47
		3	15.10	3.50	3.10	250.04	163.84	1.53
		4	15.10	3.60	3.10	251.46	168.52	1.49
		เฉลี่ย	15.10	3.55	3.14	252.03	168.19	1.50
	3	1	15.10	3.45	3.10	251.46	161.49	1.56
		2	15.10	3.55	3.10	253.16	166.18	1.52
		3	15.10	3.60	3.10	252.88	168.52	1.50
		4	15.10	3.30	3.10	252.03	154.47	1.63
		เฉลี่ย	15.10	3.48	3.10	252.38	162.67	1.55

ตารางที่ ซ.2 ปริมาตรและความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่ผลิตจากเยื่อถ่านหลังทำการบ่ม

ชนิดเยื่อ	เวลาในการบ่ม (วัน)	ชั้นงานที่	ขนาด			น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
			ความยาว (cm)	ความหนา (cm)	ความกว้าง (cm)			
ถ่าน	7	1	15.10	3.52	3.20	272.73	170.09	1.60
		2	15.10	3.31	3.20	267.62	159.94	1.67
		3	15.10	3.64	3.10	273.62	170.39	1.61
		4	15.10	3.50	2.25	269.49	171.76	1.57
		เฉลี่ย	15.10	3.49	3.19	270.87	168.05	1.61
	3	1	15.10	3.62	3.21	288.85	175.47	1.65
		2	15.10	3.61	3.27	278.53	178.25	1.56
		3	15.10	3.61	3.20	283.04	174.44	1.62
		4	15.10	3.50	3.08	280.16	162.78	1.72
		เฉลี่ย	15.10	3.59	3.19	282.65	172.74	1.64
	1	1	15.10	3.48	3.18	277.13	167.10	1.66
		2	15.10	3.70	3.18	278.37	177.67	1.57
		3	15.10	3.63	3.17	278.24	173.76	1.60
		4	15.10	3.45	3.15	274.70	164.10	1.67
		เฉลี่ย	15.10	3.57	3.17	277.11	170.66	1.63

ตารางที่ ข.3 ปริมาตรและความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่ผลิตจากเยื่อกระดาษทางการค้าก่อนทำการบ่ม

ชนิดเยื่อ	ชุดที่	ชั้นงานที่	ขนาด			น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
			ความยาว (cm)	ความหนา (cm)	ความกว้าง (cm)			
เยื่อการค้า	1	1	15.10	3.60	3.15	249.76	171.23	1.46
		2	15.10	3.50	3.10	249.48	163.84	1.52
		3	15.10	3.40	3.10	254.58	159.15	1.60
		4	15.10	3.55	2.90	254.01	155.45	1.63
		เฉลี่ย	15.10	3.50	3.06	251.96	162.42	1.55
	2	1	15.10	3.55	3.15	254.58	168.86	1.50
		2	15.10	3.50	2.90	254.86	153.27	1.66
		3	15.10	3.40	3.15	258.26	161.72	1.60
		4	15.10	3.50	3.10	254.86	163.84	1.56
		เฉลี่ย	15.10	3.49	3.01	255.64	161.92	1.58
	3	1	15.10	3.50	3.10	256.00	163.84	1.56
		2	15.10	3.50	2.95	253.73	155.90	1.63
		3	15.10	3.40	3.05	254.30	156.59	1.62
		4	15.10	3.50	3.10	251.74	163.84	1.54
		เฉลี่ย	15.10	3.48	3.05	253.94	160.04	1.57

ตารางที่ ช.4 ปริมาตรและความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่ผลิตจากเยื่อกระดาษทางการค้าหลังทำการบ่ม

ชนิดเยื่อ	เวลาในการบ่ม (วัน)	ชั้นงานที่	ขนาด			น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
			ความยาว (cm)	ความหนา (cm)	ความกว้าง (cm)			
เยื่อการค้า	7	1	15.10	3.72	3.20	275.44	179.75	1.53
		2	15.10	3.60	3.18	267.56	172.87	1.55
		3	15.10	3.50	3.20	277.89	169.12	1.64
		4	15.10	3.64	2.97	277.33	163.24	1.70
		เฉลี่ย	15.10	3.62	3.14	274.56	171.25	1.61
	3	1	15.10	3.60	3.23	280.08	175.58	1.60
		2	15.10	3.58	2.97	280.74	160.55	1.75
		3	15.10	3.50	3.30	275.70	174.41	1.58
		4	15.10	3.57	3.20	274.52	172.50	1.59
		เฉลี่ย	15.10	3.56	3.18	277.76	170.76	1.63
	1	1	15.10	3.57	3.18	274.85	171.42	1.60
		2	15.10	3.59	3.00	274.27	162.63	1.69
		3	15.10	3.45	3.17	271.26	170.35	1.59
		4	15.10	3.57	3.16	269.30	170.35	1.58
		เฉลี่ย	15.10	3.55	3.13	272.42	168.69	1.62

ภาคผนวก ฅ
ค่าความต้านทานการตัด

ตารางที่ ฅ.1 ค่าความต้านทานการตัดของเปเปอร์ครีตที่ผลิตจากเยื่อไม้

ชนิดเยื่อ	เวลาในการบ่ม (วัน)	ชั้นงานที่	ความทนทานต่อแรงกดอัน (Kgf)	ความหนาของชั้นทดสอบ (cm)	ความกว้างชั้นทดสอบ (cm)	ความยาวของชั้นทดสอบ (cm)	ความต้านทานการตัด (kgf/cm ²)
ไม้	7	1	18.41	3.52	3.20	15.10	10.5169
		2	35.7275	3.31	3.20	15.10	23.0815
		3	30.565	3.64	3.10	15.10	16.8550
		4	22.3725	3.50	3.25	15.10	12.7281
		เฉลี่ย	26.7688	3.49	3.19	15.10	15.7954
	3	1	21.5825	3.62	3.21	15.10	11.6211
		2	18.2775	3.61	3.27	15.10	9.7146
		3	26.52	3.61	3.20	15.10	14.4038
		4	25.8525	3.50	3.08	15.10	14.5883
		เฉลี่ย	23.0581	3.59	3.19	15.10	12.5820
	1	1	21.21	3.48	3.18	15.10	12.4745
		2	18.945	3.70	3.18	15.10	9.8567
		3	26.945	3.63	3.17	15.10	14.6108
		4	52.325	3.45	3.15	15.10	31.6103
		เฉลี่ย	29.8613	3.57	3.17	15.10	17.1456

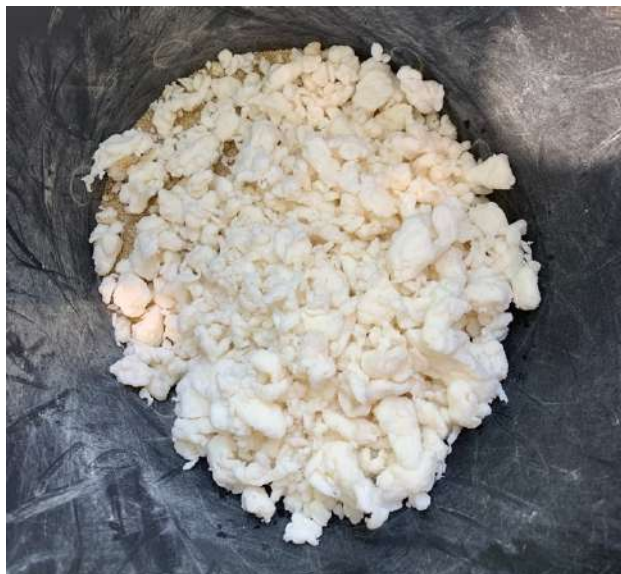
ตารางที่ ฅ.2 ค่าความต้านทานการตัดของเปเปอร์ครีตที่ผลิตจากเยื่อกระดาษทางการค้า

ชนิดเยื่อ	เวลาในการบ่น (วัน)	ชั้นงานที่	ความทนทานต่อแรงกดอัด (Kgf)	ความหนาของชั้นทดสอบ (cm)	ความกว้างชั้นทดสอบ (cm)	ความยาวของชั้นทดสอบ (cm)	ความต้านทานการตัดโค้ง (kgf/cm ²)
กระดาษ	7	1	55.555	3.72	3.20	15.10	28.4155
		2	61.32	3.60	3.18	15.10	33.7006
		3	61.345	3.50	3.20	15.10	35.4455
		4	53.945	3.64	2.97	15.10	31.0499
		เฉลี่ย	58.0413	3.62	3.14	15.10	32.1529
	3	1	52.235	3.60	3.23	15.10	28.2633
		2	51.605	3.58	2.97	15.10	30.7070
		3	64.325	3.50	3.30	15.10	36.0410
		4	60.505	3.57	3.20	15.10	33.6026
		เฉลี่ย	57.19	3.56	3.18	15.10	32.1535
	1	1	71.615	3.57	3.18	15.10	40.0229
		2	64.98	3.59	3.00	15.10	38.0660
		3	64.745	3.45	3.17	15.10	38.8666
		4	71.81	3.57	3.16	15.10	40.3859
		เฉลี่ย	68.2875	3.55	3.13	15.10	39.3354

ภาคผนวก ญ
ภาพปฏิบัติการทดลอง



รูปที่ 1 เยื่อหุ้มที่เตรียมได้ก่อนนำไปผสมเป็นเปเปอร์คริต



รูปที่ 2 เยื่อกระดาษทางการค้าที่เตรียมได้ก่อนนำไปผสมเป็นเปเปอร์คริต



รูปที่ 3 เตรียมเปเปอร์คริตโดยผสมทราย ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ น้ำ และเยื่อ ให้เข้ากัน



รูปที่ 4 อัดขึ้นรูปเปเปอร์คริตด้วยแม่พิมพ์



รูปที่ 5 เมื่อเปเปอร์คริตแห้งตัวแล้วนำออกจากพิมพ์



รูปที่ 6 ปมเปเปอร์คริตเป็นเวลา 1, 3 และ 7 วัน



รูปที่ 6 เปเปอร์คริตที่ผลิตจากเยื่อหนุ่นหลังทดสอบความแข็งแรง (MOR)



รูปที่ 7 เปเปอร์คริตที่ผลิตจากเยื่อกระดาษทางการค้าหลังทดสอบความแข็งแรง (MOR)