โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การใช้กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ในวัสดุเชิงประกอบเปเปอร์ครีต

The use of printing/writing and label paper wastes in papercrete composites

ชื่อนิสิต นางสาววิภาวี เข็มเฉลิม เลขประจำตัว 5933257723

นางสาวอารียา จันทร์บาง เลขประจำตัว 5933268623

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การใช้กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ในวัสดุเชิงประกอบเปเปอร์ครีต

(The use of printing/writing and label paper wastes in papercrete composites)

เสนอ

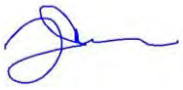
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

1.นางสาววิภาวี เข็มเฉลิม เลขประจำตัว 5933257723

2.นางสาวอารียา จันทร์บาง เลขประจำตัว 5933268623

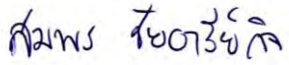
อนุมัติโดย



.....

(รศ.ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



.....

(ผศ.สมพร ชัยอารีย์กิจ)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

ปีการศึกษา 2562

หัวข้องานวิจัย การใช้กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ในวัสดุเชิงประกอบเปเปอร์ครีต

โดย นางสาววิภาวี เข็มเฉลิม รหัส 5933257723

นางสาวอารียา จันทร์บาง รหัส 5933268623

สาขาวิชา วัสดุศาสตร์

แขนงวิชา เซรามิกและวัสดุศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์

อาจารย์ที่ปรึษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ

ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

เปเปอร์ครีต (Papercrete**)** คือ วัสดุก่อสร้างที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับคอนกรีต มีความแข็งแรง น้ำหนักเบาและราคาถูก จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ในการกระบวนการผลิต ส่วนผสมที่ใช้ในการทำเปเปอร์ครีตจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทรายและเยื่อกระดาษ โดยกระดาษที่นำมาใช้จะเป็นกระดาษรีไซเคิล ทำให้สามารถลดปัญหาการใช้กระดาษอย่างสิ้นเปลืองและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาและเปรียบเทียบผลของกากกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วในการทำเปเปอร์ครีต การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 แช่เยื่อในน้ำด่างเพื่อให้เยื่อเกิดการแตกตัว พร้อมทั้งนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติและการผลิตเปเปอร์ครีต ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่พบว่าอัตราส่วนอยู่ที่ 0.75 **:** 1 ปริมาณสารช่วยไหลตัว 0.5 **%**โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิปกติและอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์อยู่ที่ 0.35 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงและมีค่าความแปรปรวนโดยน้ำหนักต่ำ ขั้นตอนที่ 3 ผสมเยื่อในอัตราส่วน 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ทำการบ่มที่ระยะเวลา 1 3 7 และ 14 วัน ในสภาวะเปียกและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ พบว่าในการผสมกระดาษใช้แล้วลงในเปเปอร์ครีตส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานกำลังอัดลดลงอีกทั้งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ เปเปอร์ครีตที่มีการผสมกระดาษ 10% โดยน้ำหนักจึงมีความแข็งแรงมากที่สุด เปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกากกระดาษฉลากมีค่าความต้านทานกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มและมีค่าสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน โดยมีค่าอยู่ที่ 3.55 MPa ส่วนกระดาษพิมพ์ใช้แล้วเขียนมีแนวโน้มไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันที่ระยะเวลาการบ่มเดียวกัน เนื่องจากมีความไม่ชอบน้ำต่างกัน เปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากจึงเหมาะสมกับการนำมาใช้งานมากกว่าเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วเพราะมีความแข็งแรงสูงกว่า มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยกว่าเหมาะสมกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างมวลเบาภายในอาคาร

Title The use of printing/writing and label paper wastes in papercrete composites
Authors Vipavee Khemchaloem
Areeya Janbang
Department Materials Science
Field Ceramics and Materials Science
Advisor Associate Professor Dr. Wantanee Buggakupta
Co-advisor Assistant Professor Somporn Chaiarrekij
Academic Year 2019

Abstract

Papercrete is a construction material similar to concrete. It is fairly strong lightweight, and low cost. It is considered as one of the environmentally friendly building materials. Papercrete mixes basically consist of Portland cement, sand and pulps derived from recycled papers. This research described a viability of using printing/writing and label paper wastes in papercrete composites. To make a papercrete, three steps were undergone. Firstly, both types of paper were soaked in alkali solution to soften paper and turn them to fibers. Forming the handsheets to see how different types of fiber could affect papercrete properties was carried out. Secondly the ratio of cement to sand was investigated then it was found that a ratio of cement to sand of 0.75:1 with superplasticizer 5 wt% of them and the water/cement ratio of 0.35 made highest compressive strength with low fluctuation. Thirdly, three mixes with 10, 20 and 30 wt% of fibers were prepared. They were cured for 1, 3, 7, and 14 days in a damp, ambient conditioner. The experimental results showed that a papercrete with used printing/writing fibers had low density and compressive strength but owned higher percent volume change compared with a normal concrete. With 10 wt% fibers, the obtained papercrete had highest compressive strength. An increase in compressive strength depended on curing times. The label-containing papercrete yielded highest compressive strength of 3.55 MPa when cured for 14 days. Meanwhile, those with printing/writing fibers did not follow this trend due to their different hydrophobicity. So, papercretes with label waste seemed to be more applicable to use as a lightweight, indoor construction material.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายภาคส่วน ดังนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ที่เสียสละเวลาเพื่อให้คำแนะนำ ความรู้ รวมถึงความช่วยเหลือต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน สำหรับวิชาความรู้ต่าง ๆ เพื่อเอื้อประโยชน์ในการทำโครงงานวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ คุณสมชาย ภวชินสร และเจ้าหน้าที่วัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงการนี้

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือต่าง ๆ เพื่อให้โครงการวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือทุก ๆ ด้าน และคอยให้กำลังใจ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

นางสาววิภาวี เข็มเฉลิม
นางสาวอารียา จันทร์บาง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข

กิตติกรรมประกาศ.....ค

สารบัญ.....ง

สารบัญตาราง.....ช

สารบัญรูป.....ซ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ที่มาของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....2

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 เยื่อกระดาษและกระดาษ (Pulp and Paper).....3

2.1.1 ชนิดของกระดาษ.....3

2.1.2 เยื่อกระดาษ.....4

2.1.3 กระบวนการผลิตกระดาษ.....6

2.1.4 สมบัติทั่วไปของกระดาษสมบัติทางโครงสร้างของกระดาษ.....8

2.1.5 กระดาษรีไซเคิล (Recycled Paper).....13

2.1.6 ฉลาก (Facestocks).....14

2.2 คอนกรีต.....16

2.2.1 องค์ประกอบทั่วไปของคอนกรีต.....16

2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....20

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต.....23

2.3 เปเปอร์ครีต.....26

2.3.1 ส่วนประกอบของเปเปอร์ครีต.....26

2.3.2 การออกแบบเปเปอร์ครีต....27
2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเชิงประกอบเปเปอร์ครีต....28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน....35
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง....35
3.1.1 วัตถุดิบ....35
3.1.2 อุปกรณ์....35
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์....36
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย....36
3.3.1 การเตรียมเยื่อกระดาษ....37
3.3.2 การเตรียมเปเปอร์ครีต....37
3.4 การตรวจสอบลักษณะสมบัติ....38
3.4.1 เยื่อกระดาษที่เตรียมได้....39
3.4.2 เปเปอร์ครีต....44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง....47
4.1 ลักษณะสมบัติของเยื่อกระดาษ....47
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงของกระดาษเมื่อแช่ในของเหลวชนิดต่าง ๆ....47
4.1.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใย....49
4.1.3 ลักษณะสมบัติของเยื่อเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ....51
4.2 ลักษณะสมบัติเปเปอร์ครีต....54
4.2.1 อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทราย....53
4.2.2 ปริมาณสารเพิ่มการไหลตัว....53
4.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของเปเปอร์ครีต....53
4.3.1 ความหนาแน่น....55
4.3.2 ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป....56
4.3.3 ความต้านทานกำลังอัด....58
4.3.4 โครงสร้างจุลภาคของเปเปอร์ครีต....61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง....67
5.1 สรุปผลการทดลอง....67

5.2 ข้อเสนอแนะ.....67

เอกสารอ้างอิง.....68

ภาคผนวก.....72

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์.....18
ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบอื่น ๆ โดยประมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์.....18
ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สาคัญของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์.....19
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมของเปเปอร์ครีตที่แนะนำ.....27
ตารางที่ 2.5 สัดส่วนส่วนผสมสำหรับเตรียมเปเปอร์ครีต.....28
ตารางที่ 2.6 สัดส่วนส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมเปเปอร์ครีต.....29
ตารางที่ 2.7 สัดส่วนส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมเปเปอร์ครีต.....30
ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตหลังบ่ม 28 วัน.....30
ตารางที่ 2.9 สัดส่วนส่วนผสมในการเตรียมเปเปอร์ครีต.....31
ตารางที่ 2.10 สัดส่วนส่วนผสมโดย %ปริมาตร.....32
ตารางที่ 2.11 สัดส่วนส่วนผสมที่แตกต่างกันของเปเปอร์ครีต.....33
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนที่เลือกและชื่อผู้วิจัย.....37
ตารางที่ 4.1 ลักษณะของกากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์เมื่อแช่ในของเหลวต่าง ๆ ในวันแรกและวันที่ 8.....47
ตารางที่ 4.2 ลักษณะของกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อแช่ในของเหลวต่าง ๆ ในวันแรกและวันที่ 8.....48
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์เส้นใยกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วโดยเฉลี่ย.....49
ตารางที่ 4.4 การดูดซึมน้ำของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว.....51
ตารางที่ 4.5 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว.....52
ตารางที่ 4.6 ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว.....52
ตารางที่ 4.7 ความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์และทรายใน
อัตราส่วนต่าง ๆ ที่เลือกมาจากงานวิจัยที่ผ่านมา.....53
ตารางที่ 4.8 ความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่มีสารช่วยไหลตัวในปริมาณต่างๆ.....54
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเฉลี่ยของคอนกรีตปกติและเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อ
กระดาษผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ หลังบ่มเป็นระยะเวลา 1 3 7 และ 14 วัน.....57
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบทดสอบความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษ
ฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วในสัดส่วน 10% 20% และ 30%โดยน้ำหนัก
ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน.....60

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของผิวกระดาษทั้ง 2 ด้าน ในด้านการจัดเรียงตัวของเส้นใย.....10
รูปที่ 2.2 รอยตะแกรงของผิวกระดาษ.....10
รูปที่ 2.3 ปริภูมิซีแล็บ.....12
รูปที่ 2.4 ชั้นภายในฉลาก.....14
รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement Hydration).....25
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง.....36
รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์สภาพเส้นเยื่อ (Fiber Quality Analyzer), model LDA02 Optest.....39
รูปที่ 3.3 เครื่องทำแผ่นแบบรวดเร็ว (Rapid Köthen Sheet Machine), PTI.....40
รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ (Cobb tester), Regmed.....41
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (Strograph Model E-S), Toyoseiki.....41
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความต้านทานแรงฉีก (Thwing-Albert Protear).....43
รูปที่ 3.7 เวอร์เนียคาลิปเปอร์.....44
รูปที่ 3.8 เครื่อง Universal testing machine, Instron-5882.....45
รูปที่ 3.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....46
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 150 เท่าของเยื่อกระดาษ.....50
รูปที่ 4.2 แผนภูมิเปรียบเทียบความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตเมื่อผสมเยื่อกระดาษในสัดส่วน
10% 20% และ 30%โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน.....55
รูปที่ 4.3 แผนภูมิเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตปกติกับเปเปอร์ครีตมีที่เยื่อกระดาษ
ผสมอยู่ 10% 20% และ 30%โดยน้ำหนัก ที่บ่มเป็นระยะเวลา 1 3 7 และ 14.....56
รูปที่ 4.4 ความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานที่มีการเติมเยื่อกระดาษแต่ละชนิดใน
สัดส่วน 0% 10% 20% และ 30%โดยน้ำหนัก ที่บ่มเป็นระยะเวลา 1 3 7 และ 14 วัน.....58
รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก
10%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน.....61
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียน
ใช้แล้ว 10%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน.....61
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก
20%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน.....63

หน้า

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษ
พิมพ์เขียนใช้แล้ว 20%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน.....63
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษ
ฉลาก 30%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน.....64

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาภาวะโลกร้อนที่มากขึ้นในปัจจุบัน การนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและลดปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจึงได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของวงการก่อสร้างก็เช่นกัน ได้มีการหาแนวทางที่จะทำให้อาคารมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือที่เรียกว่า Green Building Materials การใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้นเป็นการส่งเสริมให้มีการนำวัสดุก่อสร้างและทรัพยากรที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการคิดค้นวัสดุใหม่เพื่อแทนวัสดุเดิม อันเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมลงได้อย่างมาก

เปเปอร์ครีต (Papercrete) ถือได้ว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบชนิดหนึ่งที่มีการนำวัสดุเหลือใช้มาเป็นส่วนประกอบในการผลิต ซึ่งเปเปอร์ครีตเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่คล้ายกับคอนกรีต แข็งแรงและมีน้ำหนักเบา โดยใช้ส่วนผสมของเยื่อกระดาษผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ หรือวัสดุอื่น เช่น ทรายหรือเถ้าลอย กระดาษที่นำมาใช้เป็นกระดาษรีไซเคิล ทำให้เปเปอร์ครีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลดปัญหาภาวะโลกร้อน ทั้งยังมีราคาถูก ปัจจุบันเปเปอร์ครีตจึงมีความนิยมมากขึ้น มีการพัฒนาให้มีสมบัติวัสดุที่ดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์มากขึ้น

เยื่อหรือเส้นใยกระดาษ เป็นอีกวัตถุดิบหนึ่งที่สามารถนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และทรายในการทำคอนกรีตได้ เยื่อมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนใหญ่ มีความหนาแน่นต่ำและมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี หากนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างได้ก็จะเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายในจากการกำจัด ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่หลายคนอาจมองข้ามไปได้ทางหนึ่ง

อย่างไรก็ตามยังไม่มีผู้ที่ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุชนิดนี้ในเชิงวิชาการมากเท่าใดนัก คณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่าสมบัติของเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลากสามารถนำไปใช้ทำประโยชน์ในแนวทางนี้ได้ ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาผลของการใช้เยื่อกระดาษทั้ง 2 ชนิดในการทำเปเปอร์ครีต โดยในการทดลองจะใช้เยื่อกระดาษในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาว่าปริมาณของเยื่อกระดาษที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อเปเปอร์ครีตอย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วในการทำเปเปอร์ครีต
2. เพื่อเปรียบเทียบผลของกระดาษทั้ง 2 ชนิดต่อเปเปอร์ครีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาเยื่อกระดาษ 2 ชนิด คือ เยื่อกระดาษฉลากกับเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว
2. ส่วนผสมของเปเปอร์ครีตประกอบด้วยเยื่อกระดาษ 2 ชนิด ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และทราย
3. การเตรียมจะควบคุมอัตราส่วนผสมของน้ำต่อปูน ปริมาณสารช่วยในการไหลตัว และระยะเวลาบ่ม
4. ศึกษาลักษณะสมบัติของเยื่อกระดาษ
5. สมบัติของเปเปอร์ครีตที่ทำการทดสอบได้แก่ ความหนาแน่น การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ค่าการต้านทานกำลังอัด และโครงสร้างจุลภาคของเปเปอร์ครีต

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณการใส่เยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลากที่มีผลต่อสมบัติของเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้
2. ลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดมลพิษจากการทำลายกระดาษ

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เยื่อกระดาษและกระดาษ (Pulp and Paper)

ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ ส่วนต่าง ๆ ของพืชนานาชนิดได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ เช่น สน ไผ่ ยูคาลิปตัส ฟางข้าว ชานอ้อย หญ้าขจรจบ เป็นต้น เยื่อของเนื้อไม้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- เยื่อเส้นใยสั้น (short fiber pulp) เช่น ไม้สน ไผ่ ปอ ยูคาลิปตัส เยื่อประเภทนี้จะมีคุณภาพดี
- เยื่อเส้นใยยาว (long fiber pulp) เช่น ชานอ้อย หญ้า ฟางข้าว เยื่อประเภทนี้คุณภาพไม่ค่อยดีใช้ในการผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์ กล่องใส่ของ เป็นต้น

2.1.1 ชนิดของกระดาษ

กระดาษแบ่งตามวัตถุประสงค์การพิมพ์ ได้ดังนี้

1. กระดาษเคลือบผิว (Coated paper) คือ กระดาษที่ถูกนำไปเคลือบผิว โดยส่วนมากเรียกว่ากระดาษอาร์ต ซึ่งมีสมบัติเมื่อนำไปพิมพ์จะได้สีสันที่สวยงาม งานที่พิมพ์จะได้สีใกล้เคียงกับสีจริง สามารถนำไปเคลือบลามิเนตหรือรังสียูวีได้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ
    - กระดาษชนิดเคลือบมัน (Gloss paper) สำหรับงานพิมพ์ที่ต้องการความมันวาวเน้นสวยงามเป็นพิเศษ
    - กระดาษชนิดเคลือบด้าน (Matt paper) สำหรับงานพิมพ์ที่ต้องการความละเอียดอ่อนของภาพ [19]
2. กระดาษปอนด์ (Bond paper) คือ กระดาษที่ผ่านการฟอกและอาจมีส่วนผสมจากเศษผ้า มีสีขาว ผิวไม่เรียบ มีน้ำหนักประมาณ 60 – 100 กรัมต่อตารางเมตร เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความสวยงามปานกลาง งานพิมพ์ที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง เช่น นิตยสาร แคตตาล็อกและโบร์ชัวร์ เป็นต้น
3. กระดาษกล่อง (Box Paper) คือ กระดาษที่มีสีคล้ำไปทางเทาหรือน้ำตาล โดยจะมีผิวด้านหนึ่งที่เป็นกระดาษขาวเพื่อพิมพ์งาน Artwork เข้าไปได้ มีน้ำหนักประมาณ 180 – 600 กรัมต่อตารางเมตร เหมาะสำหรับงานกล่อง เช่น บรรจุภัณฑ์ กล่องบรรจุสินค้าหรือป้าย เป็นต้น
4. กระดาษปรู๊ฟ (newsprint) เป็นกระดาษที่ทำจากเยื่อไม้ป่น จึงทำให้มีราคาถูก คุณภาพต่ำ ถ้าเก็บไว้นานจะกรอบและแดงใช้พิมพ์หนังสือราคาถูกและหนังสือพิมพ์ [8]

5. กระดาษเหนียวหรือกระดาษสีน้ำตาลห่อของ (Kraft paper) ทำจากเยื่อ Sulphate ผสมสีน้ำตาล มีความเหนียวมากใช้ทำกระดาษห่อของหรือบรรจุภัณฑ์
6. กระดาษการ์ด (Card Board) คือ กระดาษที่มีความหนาและแข็งแรง ประกอบด้วยกระดาษหลายชั้น ชั้นนอกสองด้านมักเป็นสีขาว มีหลายสี มีน้ำหนักประมาณ 110 – 400 กรัมต่อตารางเมตร เหมาะสำหรับงานปกหนังสือหรือบรรจุภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นต้น
7. กระดาษแข็ง (Hard Board) คือ กระดาษที่ใช้ทำปกแข็งด้านในของหนังสือเมื่อใช้งานจะต้องมีกระดาษหรือวัสดุอื่นหุ้ม จึงเป็นกระดาษที่ไม่ต้องฟอกขาว ทำจากเยื่อไม้ป่นหรือเยื่อกระดาษเก่า เนื้อกระดาษจะดูสีคล้ำและผิวไม่เรียบ
8. กระดาษพาชเม้นท์ (Parchment paper) เป็นกระดาษทำเลียนแบบแผ่นหนังฟอกเยื่อกระดาษใช้เศษผ้าเป็นกระดาษที่ใช้กับงานพิมพ์ที่มีความสำคัญ [19]

2.1.2 เยื่อกระดาษ

เยื่อกระดาษ คือ เส้นใยของพืชบางชนิดรวมถึงเส้นใยของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งหลายชนิด ซึ่งผ่านการย่อยและแยกสกัดออกมาได้โดยวิธีทางเคมีและฟิสิกส์ให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ในรูปเยื่อแล้วนำมาทบให้เป็นเส้นใยเยื่อกระดาษ โดยเยื่อกระดาษที่ได้มีสมบัติพร้อมที่จะผลิตเป็นกระดาษ เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์รักษ์โลก เช่น บรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแห้งบรรจุภัณฑ์อาหารแช่เย็น บรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็ง กล่องกระดาษลูกฟูก และอื่น ๆ [13]

2.1.2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ [4]

1. การปอกเปลือกไม้ (Debarking)

ขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษเริ่มต้นตั้งแต่การเตรียมชิ้นไม้สับจากไม้ท่อนต้นกระดาษด้วยการปอกเปลือกไม้ออกซึ่งเป็นส่วนที่มีเส้นใยน้อยทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ อีกทั้งยังอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อการดำเนินการได้หากเข้าไปสู่กระบวนการผลิต เนื่องจากมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนเป็นจำนวนมากและอาจทำให้ต้องสิ้นเปลืองวัตถุดิบต่าง ๆ ในแต่ละขั้นตอนมากเกินความจำเป็น ทำให้ได้ผลตอบแทนไม่คุ้มค่า รวมทั้งคุณภาพของเยื่อกระดาษที่ได้จะอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้น ขั้นตอนการปอกเปลือกไม้จึงเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการผลิตเยื่อกระดาษ

2. การสับไม้ท่อน (Chipping)

หลังจากปอกเปลือก ไม้ท่อนที่ได้จะถูกสับให้มีขนาดเล็กลงเพื่อความเหมาะสมในการนำไปต้มเยื่อโดยใช้เครื่องสับไม้ (Chipper) ซึ่งไม้ท่อนเมื่อผ่านเครื่องสับไม้แล้ว จะได้เป็นชิ้นไม้สับ (Chip) ขนาดชิ้นไม้สับที่ได้จะมีความสำคัญต่อการผลิตเยื่อ ขนาดควรจะมีความสม่ำเสมอ ความยาวและความหนาสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือความกว้าง

3. การคัดแยกชิ้นไม้สับ (Screening)

ชิ้นไม้สับที่ได้ขนาดจะถูกแยกออกจากพวกเสี้ยนไม้ ฝุ่น และชิ้นไม้ที่มีขนาดใหญ่ ด้วยเครื่องคัดขนาดชิ้นไม้สับที่มีขนาดใหญ่จะถูกทำให้มีขนาดเล็กลง ส่วนเสี้ยนไม้และฝุ่นจะถูกรวมกับเปลือกเพื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ (Boiler) สำหรับชิ้นไม้สับที่ได้ขนาดจะถูกส่งไปยังหม้อต้มเยื่อต่อไป

4. กระบวนการทางเคมี (Chemical Pulping Process)

สำหรับขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษโดยใช้กระบวนการทางเคมีโดยทั่วไปจะเริ่มจากการนำชิ้นไม้สับเข้าสู่หม้อต้มเยื่อ เพื่อแยกเส้นใยในชิ้นไม้สับออกมา โดยใช้สารเคมีที่เรียกว่าของเหลวขาว (White liquor) หรือน้ำยาต้มเยื่อซึ่งเป็นสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ละลายสารในเนื้อไม้ที่เป็นตัวยึดเส้นใยที่จับตัวกันไว้ออกมา ซึ่งภายในหม้อต้มเยื่อจะมีการควบคุมอุณหภูมิและความดันให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อละลายลิกนินออกมาจากเส้นใยในช่วงเวลาที่กำหนด หากต้มเยื่อนานเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงของเยื่อลดลง ทั้งนี้ ในกระบวนการต้มเยื่อนั้นจะได้น้ำมันยางดำออกมาเป็นผลพลอยได้ เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าต่อไป

5. การคัดขนาดของเยื่อ (Pulp Screening)

เส้นใยที่แยกออกจากกันแล้วจะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการคัดขนาดของเยื่อ เพื่อแยกเยื่อออกจากสิ่งแปลกปลอม ได้แก่ ตาไม้ (Knot) ชิ้นไม้สับที่ผ่านการต้มยังไม่สมบูรณ์และเส้นใยที่ไม่สมบูรณ์

6. การล้างเยื่อ (Pulp Washing)

เยื่อกระดาษที่ผ่านการคัดขนาดแล้วจะต้องนำไปผ่านขั้นตอนการล้าง โดยจะแยกของเหลวจากการต้มเยื่อออกจากเยื่อกระดาษ เพื่อลดการใช้สารเคมีในขั้นตอนการผลิตถัดไป และทำให้สามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ในขั้นตอนการต้มเยื่ออีกครั้ง ซึ่งของเหลวเหล่านั้นประกอบไปด้วย สารเคมี ลิกนิน และส่วนประกอบอื่นของเส้นใย รวมกันเรียกว่า น้ำมันยางดำ

7. การสกัดลิกนินโดยใช้ออกซิเจน (Oxygen Delignification)

การสกัดลิกนินในกระบวนการนี้ ถือเป็นขั้นตอนแรกของการฟอกเยื่อโดยใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพื่อให้ลิกนินหลุดออกจากเยื่อเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีในขั้นตอนการฟอกให้น้อยลง รวมทั้งช่วยลดปริมาณน้ำเสียจากการฟอกเยื่อด้วยการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนจะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำเป็นส่วนประกอบ

8. การฟอกเยื่อกระดาษ (Pulp Bleaching)

เยื่อกระดาษที่ได้รับการสกัดลิกนินแล้วจะถูกนำมาล้างฟอกด้วยระบบที่ไม่ใช้สารคลอรีน (Elementally Chlorine Free System) และทำความสะอาดเป็นขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งจะทำให้ได้เยื่อเพื่อนำไปเข้ากระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์เขียนต่อไป

2.1.3 กระบวนการผลิตกระดาษ

กระบวนการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน [4] ดังนี้

1. การเตรียมน้ำเยื่อ (Slushing)

กระบวนการผลิตกระดาษจะเริ่มต้นจากการกวนเยื่อกระดาษ ทำความสะอาด กรอง คัดแยก และเติมส่วนผสมต่าง ๆ จนได้น้ำเยื่อเพื่อเตรียมเข้าสู่เครื่องจักรผลิตกระดาษ โดยในน้ำเยื่อจะมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เยื่อใยสั้น เยื่อใยยาว และสารเคมี จากนั้นน้ำเยื่อจะถูกส่งไปที่ถังจ่ายน้ำเยื่อ (Head Box)

2. การจ่ายน้ำเยื่อ (Head Box)

หัวจ่ายน้ำเยื่อเป็นอุปกรณ์ตัวแรกของเครื่องจักรผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งจะปล่อยน้ำเยื่อลงบนตะแกรงลวดเดินแผ่นบนแผ่นขึ้นรูป (Forming Board) อย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของเครื่องจักรผลิตกระดาษพิมพ์เขียน โดยความเร็วของน้ำเยื่อจะสูงหรือต่ำกว่าความเร็วของตะแกรงลวดเดินแผ่นเล็กน้อย เพื่อให้เกิดความแข็งแรงและความสม่ำเสมอของเส้นใยในเนื้อกระดาษ

3. การก่อตัว (Forming)

การก่อตัวเป็นแผ่นกระดาษด้วยกระบวนการกรองและการแยกน้ำออกจะเกิดจากการที่น้ำเยื่อ เส้นใย และสารเติมแต่งบางส่วนที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของช่องตะแกรงไหลผ่านตะแกรงลวดเดินแผ่นออกไป โดยอาศัยแรงดึงดูดและอุปกรณ์เสริมอื่นที่ติดตั้งอยู่ใต้ตะแกรงดังกล่าว ซึ่งน้ำที่หายไปจะส่งผลให้เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber) อยู่ใกล้ชิดกันและเกี่ยวประสานกันได้มากขึ้นจนเกิดลักษณะเป็นแผ่นกระดาษเปียกที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบในสัดส่วนที่สูงถึงร้อยละ 80 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ

4. การกดรีดน้ำ (Pressing)

สายของแผ่นกระดาษ (Paper web) ที่เกิดขึ้นหลังจากการแยกน้ำแล้วจะถูกส่งเข้าไปอยู่ระหว่างลูกกลิ้งกดรีดน้ำ เพื่อขจัดน้ำออกจากแผ่นกระดาษให้ได้มากที่สุดก่อนที่จะส่งต่อไปยังหน่วยอบแห้ง ซึ่งปริมาณน้ำที่ยังมีอยู่ในแผ่นกระดาษเปียกหลังผ่านการกดรีดน้ำแล้วจะเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 60 – 70 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ โดยน้ำหนักในส่วนกดรีดน้ำนี้มีหลายระดับขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่จะผลิต นอกจากนี้ ลูกกลิ้งกดรีดน้ำยังมีหน้าที่คล้ายกับลูกกลิ้งแดนดี (Dandyroll) กล่าวคือ ช่วยกดอัดให้เส้นใยเซลลูโลสมาอยู่ชิดกันและเกิดพันธะเคมีต่อกันได้มากยิ่งขึ้น ทำให้แผ่นกระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและเพิ่มความเรียบให้กับผิวกระดาษด้วย

5. การอบแห้งกระดาษขั้นต้น (Drying)

การอบแห้งกระดาษสามารถทำได้โดยอาศัยความร้อนจากไอน้ำอิ่มตัวความดันต่ำที่ถูกจ่ายเข้าไปข้างในลูกอบแห้ง เพื่อทำให้ผิวลูกอบแห้งร้อนขึ้น จากนั้นไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นคอนเดนเสท (Condensate) และมีสภาพเป็นฟิล์มอยู่ที่ผิวด้านในของลูกอบแห้ง ซึ่งฟิล์มนี้ต้องไม่หนาจนเกินไป เนื่องจากจะทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างไอน้ำและผิวลูกอบไม่ดี ทั้งนี้ การระบายคอนเดนเสทออกจากลูกอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการอบแห้งกระดาษและมีผลต่อต้นทุนในการผลิต ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้ปริมาณน้ำที่ในแผ่นกระดาษเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 2– 8 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ

6. การฉาบผิวกระดาษ (Size-pressing)

แผ่นกระดาษที่ผ่านหน่วยอบแห้งชุดแรกจะถูกฉาบด้วยน้ำแป้งที่ต้มสุก โดยน้ำแป้งจะฉาบอยู่ที่ผิวกระดาษ ทั้ง 2 ข้าง และจะไปอุดรูบนผิวกระดาษ ทำให้กระดาษแข็งแรงขึ้นและมีความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

7. การอบแห้งกระดาษขั้นปลาย (Drying)

ถัดจากเครื่องฉาบผิวจะเป็นส่วนให้ความร้อนแบบลมร้อนและส่วนอบแห้งชุดหลัง เพื่อทำให้กระดาษแห้ง ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้สารบางอย่างเติมผสมลงในน้ำแป้งด้วย

8. การรีดผิวกระดาษ (Calendering)

อุปกรณ์ที่อยู่ถัดจากส่วนอบแห้งชุดหลัง คือ ลูกรีดทรงกระบอกที่ทำจากโลหะวางซ้อนกัน ซึ่งมีผิวที่แข็งและเรียบมาก โดยกระดาษจะถูกดึงผ่านลูกรีด เพื่อทำให้กระดาษบางลง เรียบขึ้น และมีผิวหน้าสม่ำเสมอขึ้น

9. การเข้าม้วน (Reeling)

สายของแผ่นกระดาษที่ผ่านลูกรีดจะถูกนำเข้าม้วนแล้วนำออกจากเครื่องผลิตกระดาษเพื่อตัดเป็นม้วนขนาดเล็กหรือเป็นแผ่นเพื่อจำหน่ายต่อไป สำหรับกระดาษไม่เคลือบผิวนั้นจะถูกตัดแบ่งไปตามขนาด เช่น กระดาษ Folio กระดาษรีมเล็กขนาดต่าง ๆ

2.1.4 สมบัติทั่วไปของกระดาษสมบัติทางโครงสร้างของกระดาษ (Structural Properties)

2.1.4.1 ความหนา (caliper) หมายถึง ระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่าง ของกระดาษภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนดหน่วยที่ใช้ในสหรัฐอเมริกาจะระบุเป็นนิ้ว (inches) หรือมิล (mil) ในระบบ SI จะวัดเป็นหน่วยไมโครเมตร (micrometer) แต่ส่วนใหญ่จะวัดเป็นมิลลิเมตร (millimeter) ความหนาของกระดาษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับน้ำหนักมาตรฐาน แรงกดของลูกบดขณะเดินแผ่นการบดเยื่อ และชนิดของเยื่อที่ใช้ ความหนาแน่นปกติได้จากความสัมพันธ์ระหว่างมวลต่อปริมาตร สำหรับในวงการกระดาษจะหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักมาตรฐานได้เป็นความหนาแน่นเสมือน (apparent density) ซึ่งจะเป็นการเทียบหาความหนาแน่นของกระดาษที่ระดับน้ำหนักมาตรฐานเดียวกัน อาจมีความหนาไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

น้ำหนักกระดาษ	49	กรัมต่อตารางเมตร
ความหนา	0.085	มิลลิเมตรหรือ 8.5×10^{-5} เมตร
ความหนาแน่นเสมือนหรือเท่ากับ	$49/(8.5 \times 10^{-5})$	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
หรือ	576,470.58	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

หน่วยของความหนาแน่นเสมือนที่นิยมใช้ในระบบ SI จะกำหนดเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นความหนาแน่นเสมือนที่ได้ของกระดาษชนิดนี้จะเป็น 576 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ฉะนั้นกระดาษที่มีน้ำหนักเท่ากัน แต่มีความหนาของกระดาษต่างกันกระดาษที่มีความหนามากจะให้ค่าความหนาแน่นเสมือนน้อย ความหนาของกระดาษมีความสำคัญเพราะเครื่องพิมพ์ในแต่ละระบบการพิมพ์หรือเครื่องพิมพ์ในระบบการพิมพ์หรือเครื่องพิมพ์ในระบบการพิมพ์เดียวกันแต่ผลิตจากผู้ผลิตต่างรายกันไม่สามารถพิมพ์ได้ในทุกความหนา การพิมพ์กระดาษที่มีความหนาต่างกันต้องมีการปรับตั้งส่วนต่าง ๆ ของเครื่องพิมพ์แตกต่างกัน เพื่อให้สภาพการเดินกระดาษคล่องบนเครื่องพิมพ์มีมากที่สุด

2.1.4.2 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight หรือ grammage) หมายถึง น้ำหนักของกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เก็บในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ได้มีการควบคุมตามมาตรฐาน

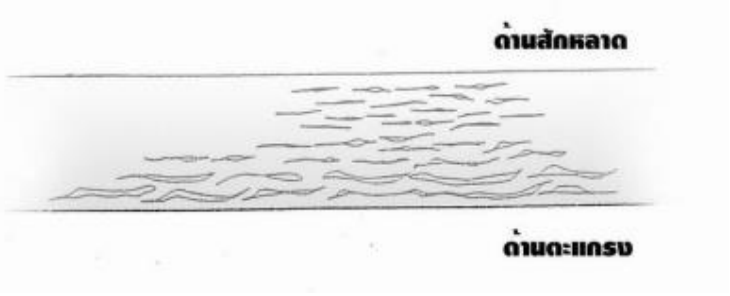
กำหนด น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษจะเป็นประโยชน์ในด้านการควบคุมการผลิตกระดาษ โดยจะควบคุมปริมาณเนื้อกระดาษที่ใช้ หน่วยที่ใช้วัดน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษจะเป็นกรัมต่อตารางเมตรตามระบบสากลทั่วไป แต่บางประเทศจะมีการใช้เป็นหน่วยปอนด์ต่อตารางฟุตหรือปอนด์ต่อ 3,000 ตารางฟุต ในปัจจุบันมาตรฐาน ISO และ TAPPI ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบกระดาษให้ใช้คำว่า “แกรมเมจ” (grammage) แทนน้ำหนักมาตรฐาน น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษนอกจากใช้เป็นเกณฑ์ในการซื้อขายกระดาษแล้ว ยังสามารถเปรียบเทียบสมบัติอื่น ๆ ของกระดาษได้ด้วย เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง กระดาษประเภทเดียวกันที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยสภาวะต่าง ๆ เหมือนกัน กระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานมากกว่าจะมีความแข็งแรง ความหนา และความทึบแสงมากกว่ากระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานต่ำกว่า [20]

2.1.4.3 ความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ (formation) หมายถึง ความแตกต่างของปริมาณ เส้นใยที่เกี่ยวประสานหรือเกิดพันธะเคมีต่อกันในแต่ละบริเวณของกระดาษ นับว่าเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่ง สำหรับกระดาษพิมพ์เมื่อนำกระดาษเนื้อไม่สม่ำเสมอกัน (wild formation) ไปพิมพ์ที่มีคุณภาพไม่ดี ความไม่สม่ำเสมอกันของเนื้อกระดาษเกิดขึ้นจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษ เช่น เส้นใย สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่นำมาผสมกันมีความแตกต่างกันในขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น ดัชนีหักเหของแสงและองค์ประกอบทางเคมี นอกจากนี้ยังขึ้นกับขั้นตอนการผสมและการเดินแผ่น ซึ่งล้วนแต่มีผลต่อการกระจายตัวและจับตัวของสารผสมเหล่านี้ทั้งสิ้น

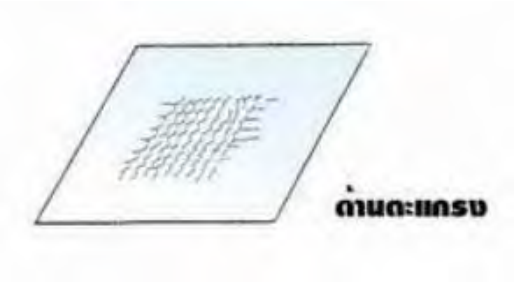
การตรวจสอบความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษสามารถทำได้โดยการยกขึ้นส่องกับแสงสว่าง ถ้ากระดาษมีความสม่ำเสมอต่ำ (poor formation) จะเห็นการกระจายตัวของเนื้อกระดาษไม่เสมอกัน ความสม่ำเสมอของกระดาษมีผลต่อสมบัติของกระดาษทั้งทางกลและทางแสงในเชิงปริมาณจะนิยามความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษว่าเป็น สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษพื้นที่ขนาดเล็ก (100 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน / น้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ย) ปัจจุบันยังไม่มีวิธีวัดที่กำหนดเป็นมาตรฐาน การเพิ่มความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของเส้นใยในกระดาษให้ดีขึ้นอาจทำได้หลายวิธี เช่น ใช้เยื่อใยสั้นมาผสมทำเป็นกระดาษในปริมาณมากขึ้น เพิ่มปริมาณการบดเยื่อให้มากขึ้น ลดความเร็วของสายพายตะแกรงแยกน้ำ เป็นต้น

2.1.4.4 ทิศทางของเส้นใย (directionality) หมายถึง แนวหรือทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย เซลลูโลสในกระดาษ โดยถ้าพิจารณาจากการเกิดเป็นแผ่นกระดาษของน้ำเยื่อบนกระดาษจะพบว่า เส้นใยเซลลูโลสส่วนมากมีการเรียงตัวไปในทิศทางการไหลและการเคลื่อนที่ของตะแกรงบนเครื่องผลิตกระดาษ ดังนั้น แนวการเรียงตัวของเส้นใย หรือแนวเส้นใยของกระดาษจึง

อยู่ใน “แนวขนานเครื่อง” (machine direction, MD) หรือแนวเกรน (grain direction) มากกว่าส่วนแนวของกระดาษที่ตั้งฉากกับแนวขนานเครื่องเรียกว่า “แนวขวางเครื่อง” (cross direction,CD) หรือแนวขวางเกรน (cross-gdrain direction) เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยในกระดาษทั้งสองแนวมีความแตกต่างกัน จึงมีผลให้สมบัติของกระดาษทั้งสองแนวแตกต่างกันด้วย



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของผิวกระดาษทั้ง 2 ด้าน ในด้านการจัดเรียงตัวของเส้นใย



รูปที่ 2.2 รอยตะแกรงของผิวกระดาษ

2.1.4.5 ความขาวและความสว่าง [11]

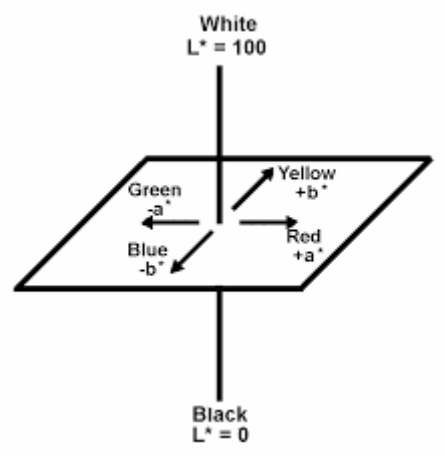
ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ มีศัพท์ภาษาอังกฤษที่ใช้เกี่ยวกับสีขาวของเยื่อหรือกระดาษอยู่สองคำคือ Whiteness และ Brightness สำหรับคำว่า Brightness ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์เขียนใช้ศัพท์ภาษาไทยว่า “ความขาวสว่าง” นั้น เป็นคำที่พบบ่อยที่สุด ส่วน Whiteness ซึ่งแปลตรงตัวว่า “ความขาว” มีที่ใช้น้อยมาก โดยเฉพาะในข้อกำหนดคุณภาพ ดังนั้น จึงมีผู้สงสัยเสมอว่า เหตุใดเราใช้คำ Brightness เป็นเกณฑ์บ่งชี้ความขาวของเยื่อกระดาษและฟิลเลอร์

ความขาว (whiteness) การรับรู้ (perception) ของคนต่อความขาวเป็นปรากฏการณ์ทางสรีรวิทยาและจิตวิทยาซึ่งอยู่นอกเหนือกฎเกณฑ์ ทางกายภาพ นิยามความขาวว่าเป็นสมบัติของพื้นผิว (diffusing surface) ที่บ่งบอกว่าพื้นผิวนั้นมีสีเหมือนกันกับสีขาวมาตรฐาน (Standard white) หรือสีขาวที่ผู้ใช้พอใจ (preferred white) มีผู้ศึกษาและเสนอสูตรคำนวณค่าความขาวหรือดัชนีความขาว (whiteness index) จากการวัดค่าสีไว้มากมาย โดยอาศัยหลักความแตกต่างของสีที่มีรูปแบบทั่วไปหลายแบบ ซึ่งสูตรคำนวณความขาวดังกล่าวล้วนเปรียบเทียบกับมาตรฐานความขาวที่กำหนดขึ้น แต่ในกรณีของสีขาวที่ผู้ใช้พอใจ (preferred white) การวัดในเชิงปริมาณย่อมกระทำได้ยากยิ่ง เนื่องจากความขาวดังกล่าวขึ้นอยู่กับประสบการณ์และรสนิยมอันเปลี่ยนแปลงได้ดังมีรายงานว่าผู้ใช้ในอเมริกาเหนือพอใจสีขาวอมชมพู ขณะที่ยุโรปนิยมสีขาวออกน้ำเงิน การใช้สารฟอกนวล (fluorescent whitening agents) ในกระดาษผ้าและผงซักฟอก ฯลฯ ทำให้การประเมินความขาวยุ่งยากขึ้นอีก ปัจจุบันกระดาษขาวที่ผลิตในประเทศไทย ได้แก่ กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษทิชชู่ล้วนมีสารฟอกนวลทั้งสิ้น สารฟอกนวลในกระดาษหรือผ้าจะเปลี่ยนรังสีอัลตราไวโอเลทซึ่งตามองไม่เห็นในแสงแดดเป็นแสงที่ตามองเห็นในช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงิน ปริมาณแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วงคลื่นนี้ ทำให้เรารู้สึกว่ากระดาษหรือผ้าขาวขึ้น โดยที่เราไม่มีวิธีวัดหรือประเมินความขาวที่ได้รับการยอมรับเป็นสากล จึงไม่ใคร่พบการระบุความขาวของกระดาษเป็นค่า whiteness แต่หากจำเป็นต้องบันทึกหรือบ่งบอกลักษณะเกี่ยวกับสีของกระดาษขาว อาจรายงานได้หลายวิธี เช่น

การกำหนดค่าสีของ (CIELAB color space) [5] สร้างขึ้นจากทฤษฎีการมองเห็นสีคู่ตรงข้าม ซึ่งต่างจากระบบการวัดสีด้วยค่าไตรสติมูลัสซึ่งเป็นระบบที่สร้างขึ้นตามทฤษฎีการมองเห็นสีไตรโครมาติก โดยแสดงเป็นปริภูมิสี 3 มิติประกอบด้วย 3 แกน คือ แกน L* แกน a* และแกน b* โดยที่

- แกน L* เป็นแกนที่ใช้แสดงมิติความสว่างสีสัมพัทธ์ของสี มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100
- แกน a* เป็นแกนที่ใช้แสดงความเป็นสีแดงและความเป็นสีเขียวของสี โดยส่วนของแกนที่เป็น “ + ” ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีแดง ยิ่งค่า a* มีค่าเป็นบวกมากเท่าไร สีก็ยิ่งมีความเป็นสีแดงมากเท่านั้นและส่วนของแกนที่เป็น “ - ” ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีเขียว ยิ่งค่า a* มีค่าเป็นลบมากเท่าใด สีก็ยิ่งมีความเป็นสีเขียวมากขึ้นเท่านั้น
- แกน b* เป็นเกณฑ์ที่ใช้แสดงความเป็นสีเหลืองและความเป็นสีน้ำเงินของสี โดยส่วนแกนที่เป็น “ + ” ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีเหลือง ยิ่งค่า b* มีค่าเป็นบวกมากเท่าไร สีก็ยิ่งมีความเป็นสีเหลืองมากเท่านั้น และส่วนของแกนที่เป็น “ - ” ใช้เพื่อ

แสดงความเป็นสีน้ำเงิน ยิ่งค่า b* มีค่าเป็นลบมากเท่าใด สีก็ยิ่งมีความเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปริภูมิซีแล็บ

แหล่งที่มา:khttps://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AAN
d9GcRAfqLkGl8ERthECjq1zyGH6L1LRQwNA-
umb0IBX3YWNE73fmgg&usqp=CAU

ความขาวสว่าง (brightness) [11] “brightness” เป็นศัพท์ที่ใช้ในหลายสาขาและมีความหมาย และคำแปลในภาษาไทยต่างกัน สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ brightness เป็น concept ทางฟิสิกส์โดยตรง หมายถึง ค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ในช่วงสีน้ำเงิน (457 นาโนเมตร) ของแผ่นกระดาษหรือเยื่อที่หนามากจนทึบแสง การวัดในช่วงแสงสีน้ำเงินช่วยให้สามารถแบ่งแยกความแตกต่างของเยื่อกระดาษชนิดต่าง ๆ ที่ฟอกขาวและไม่ฟอกได้ดี เนื่องจากเยื่อดูดซับแสงสูงสุดในช่วงคลื่นสั้นของสเปคตรัมแสงที่ตามองเห็น เนื่องจากค่า brightness ได้จากการวัดค่าการสะท้อนแสงในช่วงคลื่นเดียวย่อมไม่สามารถบ่งบอกลักษณะเกี่ยวกับสีได้ การใช้ค่า brightness บ่งชี้ความขาวของกระดาษหรือฟิลเลอร์ จึงให้ข้อมูลที่จำกัดโดยเฉพาะในช่วง brightness ต่ำกว่า 80% กระดาษที่มีค่า brightness เท่ากันอาจดูขาวต่างกันมากโดยการย้อมสี (tint) เมื่อค่า brightness สูงขึ้น ความแตกต่างนี้จะลดลงแม้จะมีข้อจำกัดด้านการประยุกต์ใช้งานอยู่ไม่น้อยความสะดวกในการวัดและหลักการที่เข้าใจได้ง่าย ทำให้การวัด brightness เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ สำหรับคำแปลในภาษาไทยว่า ความขาวสว่างนั้นเข้าใจว่าผู้บัญญัติศัพท์ต้องการแสดงเจตนาในการบ่งชี้ความขาวและรักษาความหมายเดิมในภาษาอังกฤษไว้ จึงเติมคำว่า สว่าง ต่อท้ายความขาวเป็นความขาวสว่าง

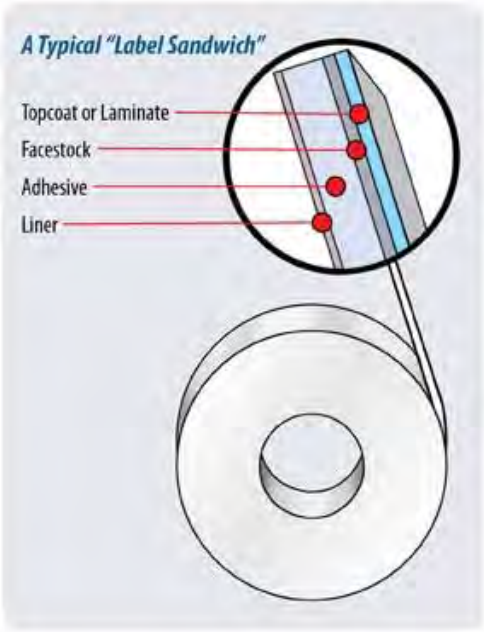
2.1.4.6 ความยาวเส้นเยื่อ [6]

เส้นใยบริสุทธิ์ที่ใช้ในการผลิตกระดาษนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ เส้นใยจากเยื่อใยสั้นที่ได้จากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ซึ่งเป็นไม้ที่ได้จากพืชดอก (Angiosperm) และเยื่อใยยาวได้มาจากไม้ยืนต้นพวกไม้เนื้ออ่อน (Softwood) ซึ่งเป็นไม้ที่ได้จากพืชจำพวกสน (Coniferous) กระดาษถูกสร้างขึ้นมาจากเส้นใยเซลลูโลสที่เกิดการประสานกันระหว่างเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นสมบัติของเส้นใยจึงส่งผลต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้และการนำไปใช้งาน (Bernard, 2005) โดยเยื่อใยสั้นมีความยาวของเส้นใยประมาณ 1 มิลลิเมตร ในขณะที่เยื่อใยยาวมีความยาวของเส้นใยประมาณ 3 มิลลิเมตร (Scott et al., 1995) ความแตกต่างนี้ส่งผลให้สมบัติกระดาษที่ผลิตได้ต่างกัน เช่น เยื่อใยสั้นจะให้กระดาษที่เรียบกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาว แต่เมื่อเปรียบเทียบในด้านความแข็งแรง โดยเฉพาะความแข็งแรงต่อแรงดึงจะพบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวนั้นมีสมบัติความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้น เนื่องจากความยาวของเส้นใยมีผลต่อการสร้างเครือข่ายพันธะของเส้นใยภายในเนื้อกระดาษ จึงส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้นแต่ความเรียบที่ได้ก็จะลดลง (Bureau, 1983) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ He และคณะ (2004) ซึ่งใช้การถ่ายภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบ Confocal microscopy เพื่อพิจารณาภาพตัดขวางของเส้นใยในกระดาษและการสัมผัสกันระหว่างเส้นใยต่อความยาวของเส้นใย พบว่าทั้งรูปร่างเส้นใยในภาคตัดขวางและความยาวของเส้นใยไม่มีผลต่อสมบัติของการสัมผัสกันระหว่างเส้นใย ถึงแม้ว่ากระดาษจะผสมเยื่อในสัดส่วนต่างกันแต่ถ้ารูปแบบการแจกแจงความยาวของเส้นใย และปริมาณ เส้นใยขนาดเล็กใกล้เคียงกันจะส่งผลให้สมบัติกระดาษบางประการใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสงและความเรียบ

2.1.5 กระดาษรีไซเคิล (Recycled Paper) [35]

กระดาษรีไซเคิลทำมาจากกระดาษที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ด้วยการนำกระดาษดังกล่าวมาเข้าเครื่องปั่นเพื่อให้เยื่อกระดาษกระจายตัวออกมา จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับกระดาษ เช่น หมึก หรือกาว เยื่อกระดาษที่ได้จากการรีไซเคิลนี้จะเป็นเยื่อที่ไม่สมบูรณ์ เส้นใยสั้นและขาดง่าย อีกทั้งสารปนเปื้อนในกระดาษยังไม่สามารถขจัดออกไปได้อย่างหมดจดอีกด้วย ดังนั้นจึงมักมีการนำเอาเยื่อกระดาษบริสุทธิ์เข้ามาผสมด้วย แต่อย่างไรก็ดีกระดาษที่ได้มักมีสีคล้ำ จึงนิยมนำไปทำเป็นกล่องกระดาษหรือกระดาษหนา หากต้องการให้กระดาษที่ผลิตออกมามีสีขาว จะต้องนำไปเข้ากระบวนการฟอกอีกครั้งหนึ่งเพื่อกำจัดลิกนินให้หมดไปหรือให้เหลืออยู่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.1.6 ฉลาก (Facestocks) [14] ฉลาก (facestocks) ถูกสร้างขึ้น เพื่อแก้ปัญหาเกือบทุกโปรแกรมในอุตสาหกรรมซึ่งสติกเกอร์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติบางอย่าง เพื่อประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในสภาพแวดล้อมการทำงานที่เฉพาะเจาะจง



รูปที่ 2.4 ชั้นภายในฉลาก
แหล่งที่มา:https://tomco.co.th/wp-content/uploads/2018/08/Label-Sandwich-diagram-new-small.jpg

2.1.6.1 กระดาษอัด หรือความดันกระดาษ (Pressure-Sensitive Papers)

- DestructoLabel การเคลือบแบบด้าน เหมาะสำหรับงานพิมพ์ระบายความร้อนและการกระแทก เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่ทนต่อการแกะออก
- กระดาษเมทาลิส กระดาษนี้มีคุณภาพการพิมพ์ที่ยอดเยี่ยม มีทั้งสีทองหรือสีเงิน
- Rotogloss กระดาษสีขาวเคลือบเงา เป็นกระดาษเคลือบพิเศษพื้นผิวมันวาวสูง ทำให้สีสันสดใส
- Semigloss Cast กระดาษสีขาวเคลือบพิเศษเล็กน้อย มีความวาวน้อยกว่า Rotogloss
- Thermalabel กระดาษสีขาวสว่างเรียบเป็นพิเศษที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์โดยตรง

- Transprint กระดาษที่มีลักษณะพิเศษที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์ มีให้เลือกทั้งแบบเคลือบผิวและแบบไม่เคลือบผิว

2.1.6.2 ความดัน – ความไวแสงของฟิล์ม (Pressure-Sensitive Films)

- Flexclear Gloss สติกเกอร์เงาใส เหมาะกับการติดฉลากเฉพาะที่ต้องการ
- Flex-Lyte ฟิล์มสีขาวที่ทนทานและมีความเงางามสูงเหมาะสำหรับงานพิมพ์หลายสี นอกจากนี้ยังมีผิวด้านเหมาะสำหรับงานพิมพ์ระบายความร้อน และเหมาะกับงานพิมพ์ที่ฉลากต้องการรีไซเคิล
- Flextuff ฟิล์มสังเคราะห์เคลือบด้านบนมีความแข็งแรงและทนทานต่อการสึกหรอ ทนต่อแสงกลางแจ้งได้ดีเยี่ยม
- Laserweb ฟิล์มไวนิลเหมาะสำหรับใช้กับเครื่องพิมพ์เลเซอร์หรือแผ่นอาหารแบบต่อเนื่อง เหมาะอย่างยิ่งสำหรับงานที่ต้องการความต้านทานต่อสารเคมี
- Transtuff Strong ฟิล์มสังเคราะห์ที่ทนต่อสภาพอากาศได้ดีเยี่ยม
- แผ่นใยโพลีเอสเตอร์สีขาวและสีเงิน หรือ โพลีเอสเตอร์ที่ใสเป็นพิเศษสำหรับ Ultraplate Gloss เหมาะสำหรับงานพิมพ์ที่มีความทนทานต่อการถ่ายเทความร้อน
- Webflex ทนทานและมีความยืดหยุ่นในการเคลือบผิว รองรับการถ่ายเทความร้อนและการพิมพ์แบบ Flexographic ทนต่อสภาพอากาศได้ดี มีสีขาวหรือโปร่งใส

2.1.6.3 ฉลากที่ไม่ไวต่อแรงกด (Non-Pressure-Sensitive Tags)

- PolyTag ฉลากความแข็งแรงสูงถูกออกแบบมาสำหรับการใช้งานกลางแจ้ง เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการพิมพ์แบบถ่ายเทความร้อน
- กระดาษโรโตคัตที่มีเงามันวาวสูงมาก ใช้บ่อยสำหรับผลิตภัณฑ์แขวนป้ายโฆษณา
- Transtag Smooth-finished ออกแบบมาสำหรับงานที่มีการถ่ายโอนความร้อน มีความคมชัดที่ยอดเยี่ยม มีความทนต่อรอยเปื้อนที่ดี

- Tyvek® มีแข็งแรงและมีสีขาว เพื่อผิวงานพิมพ์คุณภาพสูง มีความทนต่อแรงฉีกขาด และทนต่อความแห้งแล้งและสภาพดินฟ้าอากาศ ได้รับการอนุมัติสำหรับการติดฉลากตามกฎหมาย
- ฟิล์ม Ultratag Cross-laminated เป็นฟิล์มที่ทนต่อแรงฉีกขาดสูงสุด เหมาะสำหรับการใช้งานกลางแจ้ง

2.2 คอนกรีต

2.2.1 องค์ประกอบทั่วไปของคอนกรีต

2.2.1.1 ทราย

ทราย ถือเป็นวัสดุหลักที่ใช้กันทั่วไปในงานก่อสร้าง มีลักษณะเป็นหินแข็งที่แตกออกมาจากหินก้อนใหญ่ ๆ โดยทรายจะแยกตัวออกมาได้เองเมื่อเวลาผ่านไปตามธรรมชาติ ขนาดของทรายส่วนใหญ่จะอยู่ที่ระหว่าง 0.083 นิ้ว ถึง 0.0025 นิ้ว

ทรายที่ใช้ในการก่อสร้าง แบ่งออกเป็น 4 ชนิด

- **ทรายหยาบ** เป็นทรายเม็ดใหญ่ คมและแข็งแรงมาก เหมาะกับงานก่อสร้างจำพวกคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับทำโครงสร้างสะพาน เขื่อนกั้นดิน อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือโครงสร้างที่เป็นฐานรากต่าง ๆ โดยค่าความหยาบของทรายที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างจะอยู่ระหว่าง 2.6 - 3.0 ซึ่งสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างอื่น ๆ ได้ด้วย ไม่ว่าจะเป็นบ้านเรือนทั่วไปหรือตึกสูงในเมืองอย่างที่เห็นกันในปัจจุบัน
- **ทรายกลาง** จะมีขนาดเล็กกว่าทรายหยาบแต่ก็ไม่ถึงกับเล็กมาก ลักษณะของทรายไม่หยาบหรือละเอียดจนเกินไป เหมาะสำหรับงานปูนประเภทต่าง ๆ เช่น ใช้ผสมปูนสำหรับก่ออิฐ หล่อท่อ ทำพื้นบ้านหรือใช้เทพื้นคอนกรีตที่ไม่ได้ต้องการความแข็งแรงมากนัก
- **ทรายละเอียด** เป็นเม็ดทรายขนาดเล็กที่มีความละเอียดมาก จึงเหมาะนำมาใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงต่ำ ไม่ต้องใช้กำลังมากนัก เช่น นำมาเป็นส่วนผสมของปูนฉาบผิวหน้า ทำอิฐมวลเบาหรือทำลวดลายต่าง ๆ [36]
- **ทรายถม** หรือ ทรายขี้เป็ด ถือเป็นทรายก่อสร้างอีกประเภทที่ใช้สำหรับงานปรับพื้นที่ก่อนเทพื้น ถมที่หรือใส่ถุงกันน้ำท่วม แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ใช้เพื่อถมถนนต่าง ๆ

สมบัติของทรายที่ใช้ผสมคอนกรีต

1. ไม่มีดิน ถ่าน หรือฝุ่น ผสมอยู่เกินกว่า 1 % โดยน้ำหนัก
2. ไม่มีอินทรีย์สาร ได้แก่ ตะไคร่น้ำ ใบไม้หนา ฯลฯ ปะปนอยู่มาก
3. เป็นทรายน้ำจืดหรือทรายบก
4. มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม เพื่อช่วยในการเกาะตัวของคอนกรีต

2.2.1.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement)

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์หรือพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้จากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุแคลเซียมจำพวกหินปูน (limestone) ออกไซด์ของธาตุซิลิคอนและอะลูมิเนียมจำพวกดินเหนียว (Argillaceous materials) และออกไซด์ของธาตุเหล็กจำพวกลูกรัง (laterite) ที่อุณหภูมิประมาณ 1400 – 1500 องศาเซลเซียส จนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกไปหมดได้เป็นเม็ดปูนซีเมนต์ (clinker) แล้วนำเม็ดปูนซีเมนต์ไปบดเป็นผงละเอียด เมื่อนำไปผสมกับน้ำจะได้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่แข็งแรง โดยปูนพอร์ตแลนด์ธรรมดาเป็นปูนที่มีผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับการผลิตคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมาก และให้ความร้อนปานกลาง เหมาะสำหรับงานทำผิวถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ เป็นต้น [12]

- **องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์**

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลักและสารประกอบออกไซด์รอง [2] ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีรายละเอียด ดังนี้

1) สารประกอบออกไซด์หลัก (major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2) สารประกอบออกไซด์รอง (minor oxide) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลในรูปโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [2]

กลุ่ม	สารประกอบประเภทออกไซด์	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide)	CaO	60.0 – 67.0
	ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide)	SiO_2	17.0 – 25.0
	อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide)	Al_2O_3	3.0 – 8.0
	เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide)	Fe_2O_3	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	แมกนิเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)	MgO	1.0 - 4.0
	โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide)	Na_2O	0.2-1.3
	โปแตสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide)	K_2O	0.2-1.3
	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfur trioxide)	SO_3	0.1-3.0

ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาและกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง [27] ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบอื่น ๆ โดยประมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [27]

สารประกอบอื่นๆ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
สารประกอบอื่นๆ	0.5 – 3.0
การสูญเสียน้ำเนื่องจากการเผา (loss on ignition; LOI)	0.1 – 3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue)	0.20 – 0.75

ที่มา: Odler, 1998

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผาและการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติของปูนซีเมนต์ [18] ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยสารประกอบที่สำคัญมี 4 ชนิด ดังนี้

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สาคัญของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [18]

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
Tricalcium silicate	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Dicalcium silicate	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Tricalcium aluminate	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Tetracalciumalumino ferrite	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

ที่มา: Bezerra และคณะ, 2011

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาแก่ สมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตคือเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัว ให้กำลังค่อนข้างดี โดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะมีปริมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบที่มีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติไดแคลเซียมซิลิเกตจะอยู่ในรูปเบตาไดแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม มีสมบัติยึดเกาะ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดค่อนข้างช้า และช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกตมาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 15 ถึง 35

3) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดความรุนแรงมาก และทำให้ก่อตัวทันที (flash set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียม ซิลิเกต โดยปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนตในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะมีปริมาณร้อยละ 7 ถึง 15

4) เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (solid solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่าไตรแคลเซียมอะลูมิเนต โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะมีปริมาณร้อยละ 5 ถึง 10

2.2.1.3. มวลรวม (aggregate)

มวลรวม หมายถึงวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) แล้วได้เป็นคอนกรีต สำหรับคำจำกัดความของซีเมนต์เพสต์ คือส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และน้ำ ซึ่งมวลรวมมีความสำคัญต่อคุณภาพคอนกรีต เนื่องจากเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณมากที่สุด โดยทั่วไปมีประมาณ ร้อยละ 75 ของปริมาตรรวม มวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทราย กรวด และหินย่อย นอกจากนี้ยังมีมวลรวมจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ตะกรันเตาถลุง อิฐย่อย เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้มวลรวมที่เกิดตามธรรมชาติ ผสมทำคอนกรีต สำหรับคุณสมบัติสำคัญที่ต้องคำนึงถึงของมวลรวมคือความแข็งแรง ความสะอาด และขนาดคละ [9]

2.2.1.4 น้ำ (water)

น้ำเป็นส่วนผสมสำคัญในงานคอนกรีต คุณภาพของน้ำที่ใช้โดยทั่วไปจึงควรเป็นน้ำจืดที่สะอาด เช่น น้ำประปา เนื่องจากน้ำที่มีสารแปลกปลอมเจือปนอยู่มาก หากนำไปใช้ผสมคอนกรีตแล้ว อาจจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องระยะเวลาในการก่อตัว การหดตัว กำลังที่ต่ำลง ตลอดจนความคงทนของคอนกรีต

2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน [2]

ปูนซีเมนต์ มีลักษณะเนื้อละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้โดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ เรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” (Hydration reaction) ทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวและสามารถลื่นไถลได้ช่วงเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ เรียกว่า “Domant Period” หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว ถึงแม้ว่าจะนิ่มอยู่แต่ก็ไม่สามารถไหลตัวได้อีกแล้ว จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial set)” และระยะเวลาตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดนี้เรียกว่า “เวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time)” การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่เป็นของแข็งคงสภาพ

ซึ่งจะเรียกว่าจุดแข็งตัวสุดท้าย และเวลาที่ใช้ถึงจุดดังกล่าวเรียกว่า เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ซีเมนต์เพสต์จะยังคงแข็งตัวต่อไปจนกระทั่งสามารถรับน้ำหนักได้ กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า การก่อตัวและการแข็งตัว (Setting and Hardening)

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

1. อาศัยสารละลายปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออน (Ions) ในสารละลายไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น
2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้ เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้งสองลักษณะ โดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก จึงต้องแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท

2.2.2.1 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

1. แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) มีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ถึงร้อยละ 50-70 โดยปริมาตรและอยู่ในรูปอนุภาคเล็ก ๆ มีขนาดประมาณเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรทุกมิติและมีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมาก อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิเกตใน CSH ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และปริมาณน้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยา [3]

2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปริมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตรเป็นผลึกรูปร่างหลายแบบ มีทั้งผลึกเล็กที่มีด้านเท่า ผลึกใหญ่ที่ลักษณะเป็นแผ่นผลึกแบบยาว CH นี้เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงและการให้กำลังของ CH ยังต่ำกว่า CSH อีกด้วย

3. แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตมีอยู่ประมาณร้อยละ 10-15 โดยที่แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตหรือเอททริงไกต์เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมปูนกับน้ำมีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายตัวเข้าในช่องว่างเอททริงไกต์จะพยายามดันส่วนที่ล้อมรอบอยู่ออกถ้าเกิดเอททริงไกต์ตอนที่ซีเมนต์เพสต์ยังเหลวก็จะไม่มีปัญหาแต่ถ้าเกิดตอนซีเมนต์เพสต์แข็งแล้วก็จะเกิดรอยร้าวได้

4. เม็ดปูนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปแล้วเม็ดปูนจะมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 50 ไมโครเมตร และเป็นส่วนน้อยที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตรขึ้นไป เม็ดปูนซีเมนต์ขนาดเล็กสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีและทำปฏิกิริยาได้หมด ขณะที่เม็ดปูนขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาถึงแม้ว่าปฏิกิริยาจะยังคงมีต่อไปและผลิตผลไฮเดรชันที่เกิดขึ้นจะขยายเข้าสู่ช่องว่างที่เหลืออยู่แต่เนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคมีจำกัดดังนั้นเม็ดปูนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดก็ยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เพสต์

5. ความพรุนของซีเมนต์ เจลซีเมนต์เจลมีความพรุน (Porosity) และประกอบด้วยโพรงเล็ก ๆ ตั้งแต่เล็กกว่า 0.0005 ไมโครเมตรถึง 10 ไมโครเมตรขึ้นไปและความกว้างของโพรงจะกำหนดพฤติกรรมของน้ำที่อยู่ภายในโพรง โดยทั่วไปสามารถแบ่งโพรงออกเป็น 2 พวก คือ โพรงของเจล (Gel Pore) และโพรงคาปิลาริ (Capillary Pore) โพรงของเจลมีขนาดเล็กมากขนาด 0.0005 ถึง 0.01 ไมโครเมตร ส่วนโพรงคาปิลาริมีขนาดใหญ่กว่าคือประมาณ 0.01 ถึง 10 ไมโครเมตร และเป็นส่วนของช่องว่างของน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

6. น้ำในซีเมนต์เพสต์แบ่งออกได้สองจำพวก คือ

1. น้ำที่ระเหยได้ เป็นน้ำส่วนที่ถูกขจัดออกเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส รวมถึงน้ำในโพรงคาปิลารี น้ำในโพรงของเจล และน้ำบางส่วนของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต
2. น้ำที่ระเหยไม่ได้ เป็นน้ำที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์กลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของเจล และขจัดออกไปเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

7. ความถ่วงจำเพาะของเนื้อซีเมนต์เพสต์น้ำที่ระเหยออกไม่ได้จะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของเจล ดังนั้นเนื้อซีเมนต์เจลจึงหมายถึง ซีเมนต์เจลที่มีน้ำระเหยออกไม่ได้ จากการทดลองหาน้ำหนักและปริมาตรของเนื้อเจล พบว่าเนื้อซีเมนต์เจลมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 2.34-2.59

8. การยึดเหนี่ยวทางเคมีซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีคุณสมบัติคล้ายวัสดุเซรามิกซึ่งมีการยึดเหนี่ยวแบบไอออนิกโควาเลนต์ เป็นหลักการยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอร์วาลส์ มีประมาณหนึ่งในสามเท่านั้น

9. ปริมาตรของผลิตผลของไฮเดรชันผลิตผลของไฮเดรชันประกอบด้วย CSH, CH และเอททริงไกต์เป็นหลัก ซึ่งจะเข้าไปครอบครองช่องว่างที่มีอยู่ เมื่อไม่มีที่ว่างเหลืออยู่การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงหยุดลง ยกเว้นการเกิดเอททริงไกต์ซึ่งถ้ามีต่อไปจะทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์แต่โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์มีไอออนของซัลเฟตอยู่จำนวนจำกัดจึงทำให้เอททริงไกต์

ไม่เกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ดังนั้น ปริมาตรของผลผลิตไฮเดรชันจะเท่ากับปริมาตรเดิมของปูนซีเมนต์และน้ำ

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต [2]

- **คุณสมบัติของวัสดุผสม**

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมาก เนื่องจากปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังอัดของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และความละเอียดของปูนซีเมนต์ หากปูนซีเมนต์มีความละเอียดมากจะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่ง หลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน สำหรับมวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันโดยทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ สำหรับน้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ตามความใสและปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่

- **การทำคอนกรีต**

การชั่งตวงส่วนผสมโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งตวงส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากผิดพลาดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้ โดยอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยตรง นอกจากนี้การผสมคอนกรีต การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่นคอนกรีต ล้วนมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเช่นเดียวกัน จึงควรใช้วิธีทำให้เหมาะสม

- **การบ่มคอนกรีต**

ความชื้นมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หากมีความชื้นตลอดเวลา ในทางปฏิบัติจึงมักบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที ซึ่งหากมีอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่มจะยิ่งส่งผลให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตเร่งเร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิสูงมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการบ่ม หากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้นานจะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

- **การทดสอบ**

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตจะทำในรูปของการชักตัวอย่างคอนกรีตสดมาทำก้อนตัวอย่าง โดยถือว่ากำลังของก้อนตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อ

เป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต ดังต่อไปนี้

1) ขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่างการใช้ก้อนทดสอบที่ต่างขนาดและต่างลักษณะกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกัน

2) วิธีการทำก้อนตัวอย่าง การทำให้คอนกรีตแน่นด้วยการกระทุ้งเหล็ก จะให้ค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า

3) ความชื้นในก้อนตัวอย่าง หากแท่งทดสอบมีความชื้นในขณะที่จะทำการทดสอบ จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้งกว่า

4) อัตราการกด หากใช้อัตราการกดสูงในการทดสอบกำลังอัด จะทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

5) เครื่องทดสอบ น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง

- **รูปทรงของก้อนตัวอย่าง**

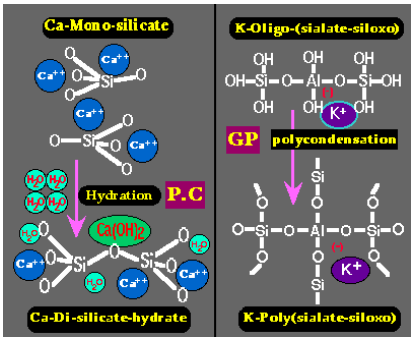
ก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่ทำขึ้นเพื่อทดสอบกำลังอัดโดยทั่วไปมี 2 รูปทรงคือ รูปทรงกระบอก และรูปทรงลูกบาศก์สำหรับรูปทรงกระบอกเป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา สำหรับรูปทรงลูกบาศก์เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ กำลังอัดของ 2 รูปทรงนี้มีความแตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1) แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด ก่อให้เกิดแรงต้านต่อการแตกด้านข้าง (confining stress) ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง

2) องค์ประกอบเรื่องความชะรูด เนื่องจากก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีความสูงมากกว่าความกว้าง จึงมีผลทำให้แรงต้านต่อการแตกด้านข้าง (confining stress) ลดลงอย่างมาก

2.2.3.1 การออกแบบคอนกรีต [24] ส่วนผสมของคอนกรีตที่แนะนำควรมีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (water to cement ratio; w/c) หรืออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) ที่ต่ำมาก ๆ เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์หรืออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่แนะนำ คือ 0.3 - 0.5



รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement Hydration)
ที่มา: http://www.geopolymer.org/science/portland-cement-chemistry-vs-geopolymer-chemistry/

2.2.3.2 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) คือคอนกรีตมวลเบาหรืออิฐมวลเบา เป็นวัสดุสำหรับก่อผนังสำหรับอาคารสูงหรือบ้านที่อยู่อาศัย เป็นวัสดุก่อสร้างที่นำเทคโนโลยีการผลิตมาจากต่างประเทศ มีทั้งแบบบล็อกตันและบล็อกกลวง (คล้ายคอนกรีตบล็อก) ขนาดใหญ่ แต่น้ำหนักเบามากกว่าเนื่องจากมีฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ อิฐมวลเบามีขนาดมาตรฐาน กว้าง 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร และมีความหนาตั้งแต่ 7.5 10 12.5 15 และ 20 เซนติเมตร มี 2 ชั้นคุณภาพคือ

1. ชั้นคุณภาพ 2 ตามมาตรฐาน มอก. 1505 – 2541 ชนิด 0.5 จะมีความหนาแน่น (Dry Density) ไม่เกิน 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังแรงอัด (Compressive Strength, fc) ไม่น้อยกว่า 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. ชั้นคุณภาพ 4 ตามมาตรฐาน มอก. 1505 – 2541 ชนิด 0.7 จะมีความหนาแน่น (Dry Density) ไม่เกิน 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังแรงอัด (Compressive Strength, fc) ไม่น้อยกว่า 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สมบัติเด่นของคอนกรีตมวลเบา

1. มีน้ำหนักเบากว่าอิฐมอญ 2 – 3 เท่า และเบากว่าคอนกรีต 4 – 5 เท่า [37]
2. กันเสียงและดูดซับได้ดี สามารถกันเสียงได้ดีกว่าอิฐมอญ ช่วยลดทอนความดังของเสียงจากภายนอกอาคารและระหว่างห้อง

3. เป็นฉนวนทางความร้อนและสามารถทนไฟได้นาน 2 – 4 ชั่วโมง
4. ทนต่อสภาวะอากาศ
5. รองรับน้ำหนักได้ดี

ประเภทของคอนกรีตมวลเบา

1. คอนกรีตเบาชนิดไร้มวลรวมละเอียด (No – Fines Concrete) คอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียดผสมอยู่ (ทราย) ทำให้มีช่องว่างระหว่างมวลหยาบที่ยึดเกาะติดกัน

2. คอนกรีตพรุน (Aerated Concrete) หรือคอนกรีตโฟม (Foamed Concrete) หรือคอนกรีตมวลเบา (Autoclaved Aerated Concrete, AAC) หรือคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าร์ (Cellular Lightweight Concrete) ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงคริสต์ศักราช 1920 โดยสถาปนิกชาวสวีเดน และนักประดิษฐ์ชื่อ Alex Erickson คอนกรีตชนิดนี้มีน้ำหนักเบาและเป็นวัสดุหล่อขึ้นมาที่เป็นทั้งโครงสร้างและฉนวนกันความร้อนในตัวเดียวกัน จากสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีจึงถูกนำไปใช้ในการก่อสร้างทั้งภายในและภายนอก นอกจากนี้การที่สามารถตัดแต่งได้ด้วยเลื่อยหรือสว่าน จึงถูกนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางอีกด้วย

2.3 เปเปอร์ครีต

เปเปอร์ครีตคือชนิดของซีเมนต์เส้นใยทำจากกระดาษหั่น (หนังสือพิมพ์เก่า กระดาษพิมพ์เขียน ฯลฯ) นำไปย่อยเอาเยื่อกระดาษในน้ำและเพิ่มปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ลงไปและในบางกรณีใช้ดินทรายเป็นตัวเติม เปเปอร์ครีตมีความแข็งโดยธรรมชาติเนื่องจากการมีพันธะของไฮโดรเจนในโครงสร้างจุลภาคของกระดาษ ส่วนผสมที่ได้นี้สามารถเทลงในแม่พิมพ์และขึ้นรูปคล้ายคอนกรีต ทำให้เป็นรูปร่างและขนาดที่ต้องการ เปเปอร์ครีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนเนื่องจากลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลงและ นำกระดาษรีไซเคิลมาใช้มากขึ้น เปเปอร์ครีตมีข้อได้เปรียบมากมายในอุตสาหกรรมการก่อสร้างคือมีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีการใช้วัสดุรีไซเคิล ใช้พลังงานต่ำ มีความแข็งแรงสูง เป็นฉนวนกันความร้อน มีการดูดซับเสียงสูง ความสวยงามและค่าใช้จ่ายที่คุ้มค่า

2.3.1 ส่วนประกอบของเปเปอร์ครีต

เปเปอร์ครีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับการสำรวจเมื่อไม่นานนี้ ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยกระดาษที่ผ่านการทำให้ยุ่ยและปูนซีเมนต์หรือดินเหนียว เป็นวัสดุทดลองที่ใช้แทนซีเมนต์ในสัดส่วนที่แน่นอนด้วยกระดาษในการผสมคอนกรีตธรรมดา [25]

2.3.1.1 เส้นใยกระดาษ

เส้นใยมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันเสียงและช่วยในการควบคุมการแตกร้าว

2.3.1.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบสำคัญของส่วนผสมและทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยึดเกาะเวลาอบแห้ง ซีเมนต์จะช่วยลดเวลาในการอบ และมีผลต่อการหดตัวของเยื่อกระดาษและเพิ่มความแข็งแรงและความมั่นคงให้กับโครงสร้าง

2.3.1.3 น้ำ (water)

เปเปอร์ครีตมีการใช้น้ำเพื่อทำให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง โดยทั่วไปจึงควรเป็นน้ำจืดที่สะอาด

2.3.1.4 ทรายละเอียด

ทรายที่ผ่านการร่อนด้วย sieve 20 mesh จึงมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 850 ไมครอน หรือประมาณ 0.85 มิลลิเมตร

2.3.2 การออกแบบเปเปอร์ครีต

การผสมส่วนประกอบต่าง ๆ ให้เข้ากันจนเป็นเนื้อคอนกรีตนั้น วัสดุผสมต่างๆ จะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม และต้องผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน อันจะส่งผลให้ได้เปเปอร์ครีตที่มีคุณภาพดี โดยส่วนผสมของ เปเปอร์ครีตที่แนะนำประกอบด้วยอัตราส่วนของสารต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมของเปเปอร์ครีตที่แนะนำ [34]

Group	Mix no.	Material	Proportion	Quantities of Material in gm.				
				Paper	Cement	Sand	Fly Ash	Glass Fiber
A	1	Paper/Cement	1-1	500	500	-	-	-
	2	Paper/ Cement	1-2	500	1000	-	-	-
	3	Paper/Cement	1-3	500	1500	-	-	-
B	4	Paper/ Cement/Sand	1-1-5	500	500	2500	-	-
	5	Paper/ Cement/Sand	1-1-3	500	500	1500	-	-
	6	Paper/ Cement/Sand	1-1-2	500	500	1000	-	-
C	7	Paper/Cement/Fly Ash	1-0.7-0.3	500	350	-	150	-
	8	Paper/Cement/Fly Ash	1-0.6-0.4	500	300	-	200	-
	9	Paper/Cement/Fly Ash	1-0.5-0.5	500	250	-	250	-
D	10	Paper/ Cement/Sand/Fly Ash	1-.7-2-.3	500	350	1000	150	-
	11	Paper/ Cement/Sand/Fly Ash	1-.7-3-.3	500	350	1500	150	-
	12	Paper/ Cement/Sand/Fly Ash	1-.7-5-.3	500	350	2500	150	-
E	13	Paper/ Cement/Glass Fiber	1-2-0.5%	500	1000	-	-	2.5
	14	Paper/ Cement/Glass Fiber	1-2-0.75%	500	1000	-	-	3.75
	15	Paper/ Cement/Glass Fiber	1-2-1%	500	1000	-	-	5.00
F	16	Paper/ Cement/Sand/Glass Fiber	1-1-3-0.5%	500	500	1500	-	2.50
	17	Paper/ Cement/Sand/Glass Fiber	1-1-3-0.75%	500	500	1500	-	3.75
	18	Paper/ Cement/Sand/Glass Fiber	1-1-3-1%	500	500	1500	-	5.00

ที่มา: Yogesh Shermale and Mahavir Balmukund Varma, 2017

2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเชิงประกอบเปเปอร์ครีต

เนื่องจากเปเปอร์ครีตเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติคล้ายกับคอนกรีต จึงเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนคอนกรีตในงานก่อสร้าง ซึ่งในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเริ่มมีการนำมาใช้งานบ้างแล้วในการเป็นวัสดุผนังภายใน ในอาคารสูง โดยน้ำหนักที่เบา เป็นฉนวนความร้อนที่ดี สามารถดูดซับเสียงได้ดี มีการนำวัสดุรีไซเคิลมาใช้ ตลอดจนความแข็งแรงที่เหมาะสมนับเป็นปัจจัยสำคัญในการนำไปใช้งาน ซึ่งทำให้การผลิตเปเปอร์ครีตที่ต้องการนั้นมีความซับซ้อน สมบัติเหล่านี้สามารถควบคุมได้ด้วยอัตราส่วนของส่วนผสมที่ใช้ ดังนั้นจึงมีรายงานวิจัยบางส่วนเกี่ยวกับการศึกษาและพัฒนาการผลิตเปเปอร์ครีต ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้เป็นแนวทางของงานวิจัยนี้

ในปี 2008 Shukeri และ Ghani [30] ได้เตรียมเปเปอร์ครีตจากปูนซีเมนต์ ทราย กรวด กระดาษใช้แล้วและน้ำ โดยมีสัดส่วนดังตารางที่ 2.5 อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 5% เนื่องจากปริมาณของกระดาษใช้แล้วที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง ในชิ้นงานที่ใช้เวลาในการบ่ม 7 และ 28 วัน สามารถรับแรงอัดได้ 16.03 N/mm^2 และ 19.00 N/mm^2 ตามลำดับ มีความสามารถดูดซึมน้ำได้ 13.9% - 62.3% ในการบ่ม 7 วัน 10.8% - 118.4% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ในการบ่ม 28 วัน โดยเมื่อมีปริมาณของกระดาษใช้แล้วเพิ่มขึ้น จะทำให้มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น

ตารางที่ 2.5 สัดส่วนส่วนผสมสำหรับเตรียมเปเปอร์ครีต

Composition	0%	5%	10%	15%
Cement (kg)	12	11.5	11	10.5
Sand (kg)	24	23	22	21
Gravel (kg)	36	34.5	33	31.5
Wastepaper (kg)	0	0.58	1.1	1.58
Water (kg)	7.2	6.9	6.6	6.3
Additional water (kg)	0	0.9	2.2	1.1
Totle water (kg)	7.2	7.8	8.8	7.4

ในปี 2013 Ahmad และคณะ [17] ได้มีการนำขี้เถ้าจากกากตะกอนกระดาษใช้แล้วมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อทดแทนการใช้ซีเมนต์ โดยมีการใช้ขี้เถ้าจากกากตะกอนกระดาษใช้แล้วในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ 5% 10% 15% และ 20% ของส่วนผสมทั้งหมด โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 5 % ของส่วนผสมทั้งหมด แสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งในชิ้นงานที่ใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน สามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นถึง 10 % ส่วนในชิ้นงานที่ใช้เวลาในการบ่ม 28 วัน สามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น 15% รวมทั้งมีการดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าอัตราส่วนผสมอื่น ๆ

ตารางที่ 2.6 สัดส่วนส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมเปเปอร์ครีต

Paper Sludge Ash (%)	w/c ratio	Water (kg/m^3)	Cement (kg/m^3)	Fine Aggregate (kg/m^3)	Paper Sludge Ash (kg/m^3)	Coarse Aggregate (kg/m^3)	Slump (mm)
0	0.45	191.6	425.80	543.5	0.00	11199.36	25
5	0.45	191.6	404.51	543.5	21.29	1199.36	24
10	0.45	191.6	383.22	543.5	42.58	1199.36	20
15	0.45	191.6	361.93	543.5	63.87	1199.36	16
20	0.45	191.6	340.64	543.5	85.16	1199.36	13

ในปี 2014 Aciu และคณะ [16] ได้มีการนำปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 32.5, ทรายขนาด 0-4 mm, น้ำ และหนังสือพิมพ์หรือกระดาษใช้แล้ว มีสัดส่วนดังตารางที่ 2.7 โดยอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือส่วนผสมในสูตรที่ 4 เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์มาก จึงทำให้สามารถรับแรงอัดได้มากกว่าสูตรอื่น ๆ โดยชิ้นงานสามารถรับแรงอัดได้ 2.51 N/mm^2 และมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.61 $kg/(m^2min^{0.5})$

ตารางที่ 2.7 สัดส่วนส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมเปเปอร์ครีต

Recipe	Cement	Sand (0-4) [kg]	Water [1]	Copy Paper [kg]	Newsprint Paper [%]	Used Paper [%]
1	200	300	320	810	-	50
2	400	400	440	810	-	40
3	400	400	440	-	810	40
4	500	400	440	-	810	38

ในปี 2015 Saurabh และคณะ [29] ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมของเปเปอร์ครีตโดยมีอัตราส่วนของส่วนผสมและค่าความต้านทานกำลังอัดดังตารางที่ 2.8 จากตารางที่ 2.8 พบว่าเปเปอร์ครีตมีค่าความต้านทานกำลังอัดสูงสุด 1.64 MPa ในอัตราส่วนกระดาษ : ปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1:1:2

ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตหลังบ่ม 28 วัน

Sample	Paper : Cement : Sand	Compressive strength (MPa)
A1	1 : 2 : 3	1.44
A2	1 : 1 : 2	1.64
A3	1 : 0.33 : 1.32	1.20
A4	1 : 0.25 : 0.125	1.41
A5	1 : 0.2 : 0.125	1.23
A6	1 : 0.165 : 0.125	1

ในปี 2015 Pitroda และคณะ [28] ได้เตรียมเปเปอร์ครีตจาก ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ น้ำ และตะกอนจากกระดาษใช้แล้ว โดยมีสัดส่วนส่วนผสมดังตารางที่ 2.9 โดยอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือสูตร C1-M25 ที่มีการเติมตะกอนจากกระดาษใช้แล้ว 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณของตะกอนกระดาษใช้แล้วมีผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด โดยยิ่งมีปริมาณของตะกอน

กระดาษใช้มาก ความสามารถในการรับแรงอัดจะยิ่งลดลง ซึ่งชิ้นงานที่ได้ในระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วันมีค่าความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 20.15, 23.56 และ 29.63 N/mm^2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.9 สัดส่วนส่วนผสมในการเตรียมเปเปอร์ครีต

Concrete grade	Concrete Type	% Reduction in cement	Materials					Total Cost [m^3]	% Change in Cost
			Cement [kg/m^3]	Fine aggregate [kg/m^3]	Coarse Aggregate [kg/m^3]	Grit [kg/m^3]	Hypo sludge [kg/m^3]		
M25	A1-M25	0	479	487.5	718.22	478.81	0	4135.12	0
	C1-M25	10	431.1	487.5	718.22	478.81	47.9	3857.30	(-) 6.71

ในปี 2015 Sheth และ Joshi [23] ได้เลือกใช้วัสดุหลักในการเตรียมส่วนผสมเปเปอร์ครีตคือกระดาษใช้แล้ว (หนังสือพิมพ์) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เกรด OPC-53 ทราย น้ำดื่ม และดิน โดยมีสัดส่วนส่วนผสม 4 ชนิด ดังตารางที่ 2.10 โดยชิ้นงานเปเปอร์ครีตที่ได้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม และมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเยื่อกระดาษเปียกในส่วนผสมเพิ่มขึ้น หลังจากใช้เวลาในการบ่ม 3 วัน ชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงอัดเฉลี่ย 0.57 N/mm^2 น้ำหนักเฉลี่ยของชิ้นงาน 8 ก้อน มีค่า 3.624 kg. ซึ่งมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ มีการหดตัว 8-9% ในแต่ละชิ้นงานในทุกกรณี สามารถดูดซึมน้ำได้ประมาณ 30 % และต้องใช้เวลาในการอบอย่างน้อย 40 ชม. หลังจากนั้นเพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นควรนำไปตากแดดอีก 4 วัน

ตารางที่ 2.10 สัดส่วนส่วนผสมเป็น %ปริมาตร

Mix no.	Wet paper pulp (%)	Damp earth (%)	Dry sand (%)	Portland cement (%)
1	50	30	10	10
2	60	20	15	15
3	65	25	10	-
4	70	15	15	-

ในปี 2015 Singh และคณะ [31] ได้มีการนำปูนซีเมนต์ ทราย และกรวด มาทำคอนกรีต และนำกระดาษใช้แล้วมาเป็นหนึ่งในส่วนผสม โดยมีการใช้กระดาษใช้แล้วในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ 0% 10% 15% และ 20% ของส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 10% โดยชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 3% มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 0.5% ของคอนกรีตปกติ ชิ้นงานสามารถยุบตัวได้ลดลง 6.3% และสามารถดูดซึมน้ำได้ลดลง 0.1% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายลงถึง 1.5% 2.2% และ 3.0% จากการนำกระดาษใช้แล้วมาใช้งาน 10%, 15% และ 20% ตามลำดับ

นอกจากนี้ในปี 2015 Mishra และคณะ [26] ยังมีการเตรียมเปอร์เปอร์ครีตจากการใช้ส่วนผสมของปูนที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และกระดาษใช้แล้ว โดยมีการใช้กระดาษใช้แล้วในอัตราส่วนที่ต่างกันไป ได้แก่ 0%, 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ของส่วนผสมทั้งหมด โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 5% ของส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นถึง 4.6% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ

ในปี 2017 Shermale และ Varma [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำชิ้นงานเปเปอร์ครีตขนาด 100×100×100 มิลลิเมตรมาทำการทดสอบ โดยใช้ปูนซีเมนต์ ทราย และกระดาษ โดยสรุปว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการทำเปเปอร์ครีตในการทดลองนี้ อยู่ในกลุ่ม B เนื่องจากปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญในการรับแรงอัด ซึ่งยิ่งมีสัดส่วนของซีเมนต์มาก ยิ่งสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น โดยชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่นโดยมวลสูงสุด คือ 1.117 g/cm^3 และสามารถรับแรงอัดได้ 3.5 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จาก

อัตราส่วนผสมในกลุ่ม C ที่ใช้เถ้าลอยมาเป็นหนึ่งในส่วนผสม ได้ชิ้นงานเปเปอร์ครีตที่มีความหนาแน่นโดยมวล 0.478 g/cm^3 สามารถรับแรงอัดได้ 2.5 MPa โดยชิ้นงานที่ทำจากเปเปอร์ครีตมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตปกติสูงสุดถึง 57% ของความหนาแน่นทั้งหมด

ตารางที่ 2.11 สัดส่วนส่วนผสมที่แตกต่างกันของเปเปอร์ครีต

Group	Mix no.	Materials	Proportion	Quantities of Material in gm.				
				Paper	Cement	Sand	Fly Ash	Glass Fiber
B	1	Paper/Cement/Sand	1-1-5	500	500	2500	-	-
	2	Paper/Cement/Sand	1-1-3	500	500	1500	-	-
	3	Paper/Cement/Sand	1-1-2	500	500	1000	-	-
C	4	Paper/Cement/Fly Ash	1-0.7-0.3	500	350	-	150	
	5	Paper/Cement/Fly Ash	1-0.6-0.4	500	300	-	200	
	6	Paper/Cement/Fly Ash	1-0.5-0.5	500	200	-	250	

ในปี 2017 Abishek [15] ได้เตรียมเปเปอร์ครีตโดยนำปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด (0.075 mm) และมวลรวมหยาบ (4.75 mm.) มาผสมกับตะกอนที่ได้จากกระดาษใช้แล้วและตัวชะลอการเกิดปฏิกิริยา โดยมีการใช้ตะกอนที่ได้จากกระดาษใช้แล้วในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ 0% 10% 20% 30% และ 40% ของอัตราส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 30% โดยตะกอนที่ได้จากกระดาษใช้แล้วจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ซึ่งในชิ้นงานที่มีการบ่มเป็นเวลา 7 วัน จะมีความสามารถในการรับแรงอัดถึง 19.87 kN และเพิ่มขึ้นเป็น 28.12 kN ในชิ้นงานที่มีการบ่มเป็นเวลา 28 วัน

ในปี 2017 Gorgis และคณะ [21] ได้เตรียมเปเปอร์ครีตจาก ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ ในสัดส่วน 1:1.9:2.5 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ w/c = 0.3 และมีการเติมเยื่อกระดาษ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 5% ซึ่งชิ้นงานมี

ความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 33.2 42.1 และ 49.9 MPa ในระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำ 5.9%

จากผลการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การใช้กระดาษเป็นส่วนผสมบางส่วนในการทำคอนกรีตจะได้ชิ้นงานที่มีสมบัติไม่ต่างจากคอนกรีตปกติมากนัก โดยชิ้นงานที่ได้สามารถรับแรงอัดได้ดี มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของส่วนผสมที่แตกต่างกันมีผลต่อสมบัติของเปเปอร์ครีตที่ได้ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของกระดาษในส่วนผสมมากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานลดลงและมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งการนำเยื่อกระดาษมาใช้เป็นส่วนผสมบางส่วน จะเป็นการลดปริมาณวัสดุที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ และยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย โดยยิ่งมีปริมาณกระดาษในเปเปอร์ครีตมากเท่าไหร่ ต้นทุนในการผลิตก็จะยิ่งต่ำลงมากเท่านั้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบ

1) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1
2) กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว
3) กากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์
4) ทราย
5) น้ำ
6) อะซิโตน
7) สารที่ช่วยในการไหลตัว (super plasticizer): polycarboxylate ยี่ห้อ VINNAPAS
8) Silica gel
9) โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.1.2 อุปกรณ์

1) เตาอบ
2) ตะแกรงร่อนขนาด
3) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล
4) แม่พิมพ์ยางขึ้นรูปขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร
5) เครื่องปั่นน้ำผลไม้
6) เครื่องปั่นแห้ง
7) ตู้แช่เยื่อ
8) ถุงซิปล็อก
9) ผ้าขาวบาง
10) ปลอกหมอน
11) เครื่องผสมอาหาร (Mixer)

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์

1) Universal testing machine รุ่น Instron-5882

2) Scanning Electron Microscopy (SEM)

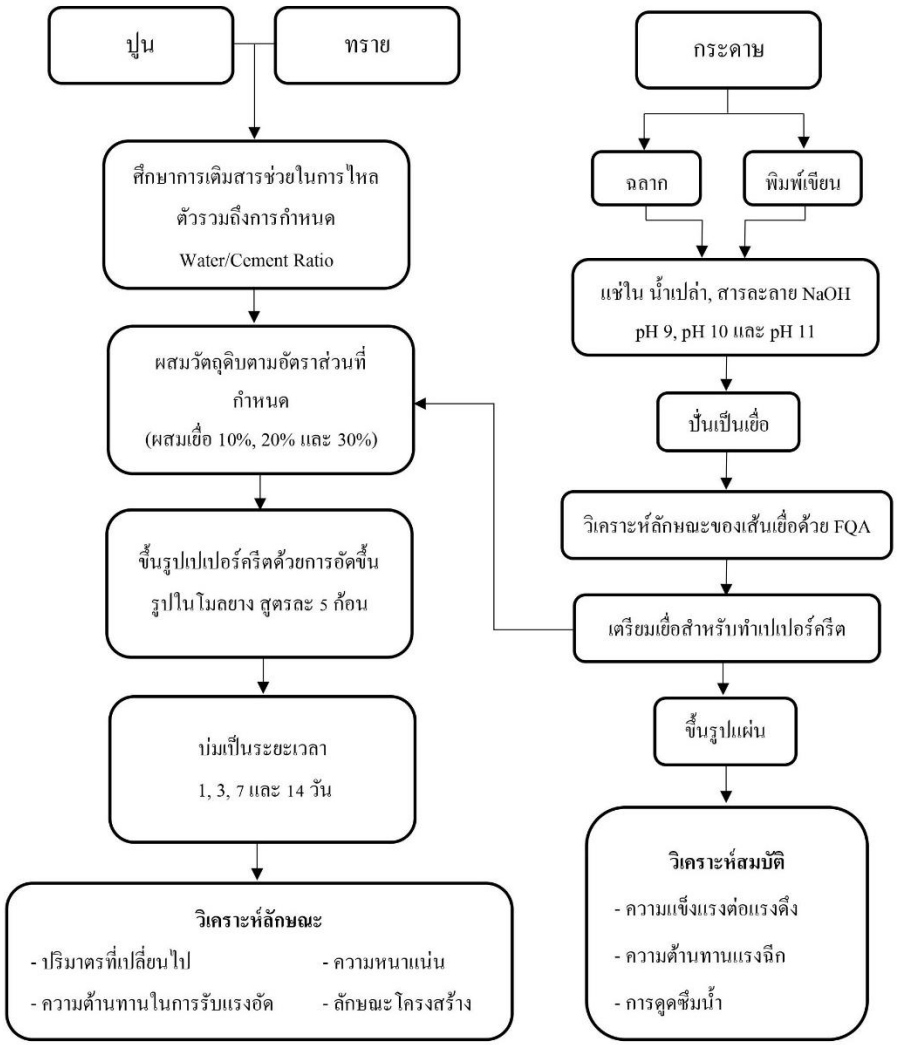
3) เครื่องวัดความชื้น

4) Fiber Quality Analyzer (FQA)

5) เวอร์เนียคาลิปเปอร์

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมเยื่อกระดาษและการเตรียมเปเปอร์ครีต ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเยื่อกระดาษ

3.3.1.1 การเตรียมเยื่อจากกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลาก

(1) นำกระดาษใช้แล้วมาตัดด้วยเครื่องทำลายเอกสาร

(2) ทดลองแช่กระดาษให้เปื่อยในของเหลวต่าง ๆ ได้แก่ น้ำเปล่า, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH9, pH10 และ pH11 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระดาษเป็นเวลา 1 สัปดาห์

(3) ปั่นกระดาษให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ โดยใช้ความเร็วรอบระดับปานกลาง เป็นเวลา 10 นาที

(4) วิเคราะห์ลักษณะของเยื่อกระดาษด้วยเครื่อง Fiber Quality Analyzer เพื่อเลือกชนิดของเหลวที่จะนำมาใช้ในการทดลอง

(5) เตรียมเยื่อสำหรับใช้ในการผลิตเปเปอร์ครีตโดยแช่กระดาษในของเหลวที่เลือกเป็นเวลา 1 วัน แล้วปั่นให้ละเอียดดังข้อ (3)

(6) ปั่นแห้งน้ำเยื่อด้วยเครื่องซักผ้า เพื่อไล่น้ำออก

(7) นำเยื่อที่เตรียมได้มาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น

3.3.2 การเตรียมเปเปอร์ครีต

(1) หาอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต่อทรายในการผลิตคอนกรีตปกติโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการผลิตคอนกรีต โดยทดลองผสมตามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 3 แบบ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนที่เลือกและชื่อผู้วิจัย

ปูน : ทราย	ชื่อผู้วิจัย
1 : 1.9	Iqbal N.Gorgis และคณะ [21]
1 : 1	Yogesh และคณะ [34]
0.75 : 1	ณปภัช โล่สุวรรณกุล และ สุธางศุ์หทัย เนตรรักษ์สกุล [38]

(2) ทดลองเติมสารช่วยเพิ่มการไหลตัว (Super plasticizer) ปริมาณต่าง ๆ ในอัตราส่วนที่เลือกมาจากขั้นตอนที่ 1 โดยเติมสารช่วยเพิ่มการไหลตัวปริมาณ 0.5 1 1.5 และ 2 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จากนั้นทดลองขึ้นรูปและนำไปทดสอบหาความต้านทานกำลังอัด

(3) กำหนดอัตราส่วนผสมในการขึ้นรูปเปเปอร์ครีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ทราย และเยื่อกระดาษเป็นส่วนประกอบ โดยเลือกใช้อัตราส่วนผสมปูนต่อทรายที่มีความต้านทานกำลังอัดมากที่สุดจากขั้นตอนที่ 2 รวมถึงปริมาณสารที่ช่วยเพิ่มการไหลตัวและ Water/Cement Ratio มาผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกระดาษฉลากจำนวน 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก

(4) ชั่งวัตถุดิบตามอัตราส่วนที่กำหนด ผสมกันด้วยเครื่องตีผสมเป็นเวลา 10 นาทีจนเข้ากัน

(5) ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เปเปอร์ครีต โดยวิธีการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ยาง จากนั้นใส่ถุงซิปล็อกและทิ้งไว้ 1 วัน วิธีนี้จะสามารถสังเกตสภาพคงตัวของเปเปอร์ครีตได้

(6) แกะเปเปอร์ครีตที่เซ็ตตัวออกจากแม่พิมพ์ นำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นวัดความกว้าง ความยาวและความสูงของเปเปอร์ครีตด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์

(7) นำเปเปอร์ครีตห่อด้วยผ้าขาวบางชุบน้ำและใส่ถุงซิปล็อกไว้ เพื่อบ่มเป็นเวลา 1 3 7 และ 14 วัน

(8) เมื่อครบกำหนด นำเปเปอร์ครีตออกจากถุงซิปล็อกและทิ้งไว้ให้แห้งสนิทเป็นเวลา 1 วัน เท่า ๆ กัน จากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดความกว้าง ความยาว และความสูงอีกครั้ง

(9) นำเปเปอร์ครีตที่ได้มาทดสอบความต้านทานกำลังอัดด้วยเครื่อง Universal testing machine

3.4 การตรวจสอบลักษณะสมบัติ

3.4.1 ลักษณะสมบัติของเยื่อกระดาษที่เตรียมได้

3.4.1.1 ลักษณะของเส้นใย

วิเคราะห์ลักษณะของเส้นเยื่อด้วยเครื่องวิเคราะห์สภาพเส้นใย (Fiber Quality Analyzer: FQA) มาตรฐาน TAPPI T271 แสดงดังรูปที่ 3.2 การเตรียมตัวอย่างทำโดยทำเยื่อที่

เตรียมจาก 3.3.2 เพียงเล็กน้อยมาใส่ในบีกเกอร์พลาสติกที่มีน้ำเปล่าอยู่ จากนั้นนำไปวางที่แท่นวางตัวอย่างของเครื่อง FQA หลักการวิเคราะห์จะใช้เทคนิค Circular polarization ในการวัดความยาวและรูปร่างของเส้นเยื่อ และใช้การถ่ายภาพ (Single camera) ในการวิเคราะห์เส้นเยื่อทั้งหมดพร้อม ๆ กัน โดยเปรียบเทียบลักษณะของเส้นเยื่อที่แช่ด้วยของเหลวต่าง ๆ เพื่อเลือกของเหลวที่ทำให้ได้เส้นเยื่อมีคุณภาพมาเตรียมผลิตเปเปอร์ครีตต่อไป

รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์สภาพเส้นเยื่อ
(Fiber Quality Analyzer), model LDA02 Optest

3.4.1.2 เยื่อเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ (handsheet)

นำเยื่อมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษด้วยวิธีการขึ้นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ด้วยเครื่องทำแผ่นแบบรวดเร็ว (Rapid Köthen Sheet Machine), PTI แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยใช้หลักการพัดพาของน้ำช่วยในการจัดเรียงของเส้นเยื่อ เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่น และอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 90^{o}C ด้วยแท่นอบที่ติดมากับตัวเครื่อง เป็นเวลา 8 นาที จะได้แผ่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานแปรผันตามปริมาณเยื่อที่ใช้ โดยการทดลองนี้กำหนดให้กระดาษที่ใช้ทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานประมาณ 80 ± 3 กรัมต่อตารางเมตร

รูปที่ 3.3 เครื่องทำแผ่นแบบรวดเร็ว (Rapid Köthen Sheet Machine), PTI

- **การซึมน้ำ (Water absorptiveness)**

ทดสอบการซึมน้ำของกระดาษด้วยอุปกรณ์ทดสอบการซึมน้ำ (Cobb tester) มาตรฐาน TAPPI T441 แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยนำกระดาษที่ขึ้นรูปได้มาตัดให้มีขนาดพอดีกับเครื่องทดสอบ โดยตัดตามแผ่นตัวอย่างสี่เหลี่ยมของชุดทดสอบ ชั่งน้ำหนักกระดาษก่อนทดสอบ (W_1) จากนั้นวางกระดาษลงบนเครื่องทดสอบ โดยหงายด้านที่ต้องการทดสอบสัมผัสกับน้ำ โดยตรวจสอบให้มั่นใจว่าจะไม่มีการรั่วไหลของน้ำออกมา แล้วจึงเทน้ำปริมาตร 100 mL ลงไปอย่างรวดเร็ว เริ่มจับเวลาทันทีเป็นเวลา 120 วินาที เมื่ออีก 10 ± 2 วินาทีก่อนครบเวลา ให้เทน้ำออกอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำกระดาษที่ทดสอบมาวางบนกระดาษซับ (bottling paper) โดยหงายด้านเปียกขึ้น และนำกระดาษซับอีกแผ่นวางทับข้างบน แล้วใช้ลูกกลิ้งเหล็กกลิ้งทับโดยกลิ้งไปด้านข้าง 1 ครั้ง และด้านหลัง 1 ครั้ง โดยการกลิ้งจะไม่มีการใส่น้ำหนักลงไป จากนั้นชั่งน้ำหนักกระดาษหลังทดสอบ (W_2) และคำนวณค่าน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึมโดยกระดาษเนื้อที่ 1 ตารางเมตรภายในระยะเวลาและภาวะที่กำหนดได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{การซึมน้ำต่อหน่วยพื้นที่ } (g/m^2) = [W_2 - W_1] \times 100 \times 0.0645 \quad (3.1)$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักกระดาษก่อนทดสอบ (g)

W_2 = น้ำหนักกระดาษหลังทดสอบ (g)

รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ (Cobb tester), Regmed

แหล่งที่มา: https://www.chemihouse.com/images/REGMEDPAPER/image004.gif

- **ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)**

การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Strograph Model E-S) ตามมาตรฐาน TAPPI T494 แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยกำหนดให้ใช้ Load Cell 500 N. ระยะห่างระหว่าง Clamp 10 cm. การเตรียมชิ้นงานทดสอบทำโดยการตัดกระดาษกว้าง 1.5 cm. และยาวมากกว่า 10 cm. เพื่อให้มีพื้นที่สำหรับหนีบที่ Clamp จากนั้นนำกระดาษใส่ระหว่าง Clamp โดยหนีบกระดาษให้ตึงและตรง เมื่อเครื่องทดสอบเสร็จจะสามารถอ่านค่าระยะที่ยืดออก (mm.) ได้ และสามารถคำนวณค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าร้อยละการยืด ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าระยะขาดได้จากสมการที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (Strograph Model E-S), Toyoseiki

แหล่งที่มา: http://xebex.jp/_userdata/Toyo-210-E.pdf

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

เมื่อ Force = ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง (N)

Width = ความกว้างของกระดาษ (m)

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

เมื่อ ความยาวที่เปลี่ยนไป = ความยาวที่เพิ่มขึ้น - ความยาวเริ่มต้น

ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index, ${}^{Nm}/_{g}$) $= \frac{\text{ความแข็งแรงต่อแรงดึง } (N/m)}{\text{น้ำหนักพื้นฐานของกระดาษ } (g/m^2)}$ (3.4)

ค่าระยะขาด (Breaking length, m) $= \frac{(102000 \times T)}{R}$ (3.5)

เมื่อ T = Tensile strength (kN/m)

R = Basis weight (g/m^2)

- **ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)**

ค่าความต้านทานแรงฉีก (tear resistance) หรือ ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear strength) สามารถวัดได้จากเครื่องวัดค่าความต้านทานแรงฉีก (Thwing-Albert Protear) มาตรฐาน TAPPI T414 แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ตัว Pendulum ในการฉีกกระดาษ เตรียมตัวอย่างโดยตัดกระดาษให้มีขนาดความยาว 53 mm และกว้าง 63 mm จากนั้นทำไปใส่ที่แท่นจับตัวอย่าง โดยให้ด้าน 63 mm อยู่ในแนวตั้ง ในการทดสอบนี้จะใช้กระดาษซ้อนกัน 2 ชั้น จึงสามารถคำนวณค่าความต้านทานแรงฉีกและค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก ได้จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความต้านทานแรงฉีก (Thwing-Albert Protear)

แหล่งที่มา: https://img.directindustry.com/images_di/photo-g/17719-11285775.jpg

$$\text{ค่าความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance, mN)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้ } (mN)}{2} \tag{3.6}$$

$$\text{ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index, } mN \cdot \frac{m^2}{g}) = \frac{Tear\ strength\ (mN)}{Basis\ weight\ (g/m^2)} \tag{3.7}$$

3.4.2 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของเปเปอร์ครีต

3.4.2.1. ความหนาแน่น

นำเปเปอร์ครีตที่ได้มาทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ของผลิตภัณฑ์เปเปอร์ครีตที่มีอายุ 1, 3, 7 และ 14 วัน จากสมการที่ 3.8

$$\text{ความหนาแน่นรวม (bulk density, g / mm}^3) = \frac{m}{v} \tag{3.8}$$

เมื่อ m = mass (g.)

v = volume (mm^3)

3.4.2.2. ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

นำเปเปอร์ครีตที่ได้มาทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงานโดยการใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ แสดงดังรูปที่ 3.7 เพื่อหาค่าความกว้าง ความยาว และความสูงของก้อนเปเปอร์ครีตก่อนเริ่มบ่มและวัดอีกครั้งเมื่อผลิตภัณฑ์แห้งตอนหลังบ่ม แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป จากสมการที่ 3.9

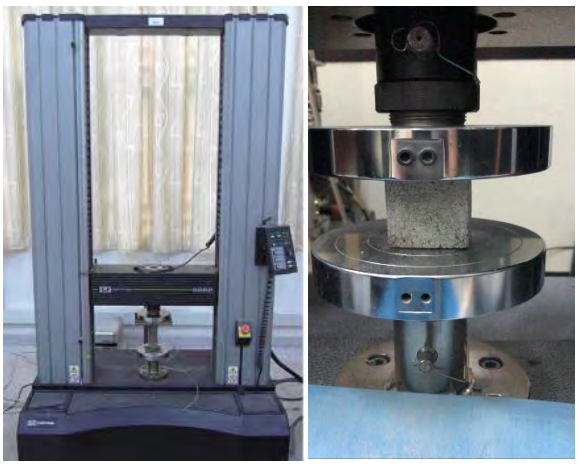
รูปที่ 3.7 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

แหล่งที่มา: https://www.ponpe.com/images/stories/virtuemart/product/101-26017.jpg

$$\text{ปริมาตรทรงลูกบาศก์ } (mm^3) = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \tag{3.9}$$

3.4.2.3. ค่าความต้านทานกำลังอัด (Compressive strength)

นำเปเปอร์ครีตที่ได้มาทดสอบความต้านทานกำลังอัดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C39 ด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น Instron-5882 แสดงดังรูปที่ 3.8 เพื่อหาค่าความสามารถในการรับแรงอัดของเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้ ซึ่งกำลังอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของคอนกรีต กำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับส่วนผสม (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm จำนวน 5 ก้อนต่อ 1 สูตร หลักการใช้งานของเครื่องจะให้ Load ลงมากดชิ้นตัวอย่างในแนวดิ่งและแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดที่จอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.8 เครื่อง Universal testing machine, Instron-5882

แหล่งที่มา: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0263823112001000-gr3.jpg

3.4.2.4 โครงสร้างจุลภาค

นำเปเปอร์ครีตมาทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยนำชิ้นส่วนของเปเปอร์ครีตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานกำลังอัดมาวิเคราะห์ ซึ่งเตรียมตัวอย่างได้โดยการทุบชิ้นส่วนเปเปอร์ครีตให้มีขนาดเล็กแล้วนำมาติดลงบนแผ่นทองเหลืองด้วยเทปคาร์บอน โดยพยายามติดให้ชิ้นงานเรียงตัวในลักษณะเดี่ยว ๆ ไม่เกาะกลุ่มกัน จากนั้นนำตัวอย่างมาฉาบผิวด้วยทอง และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างโดยตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ แล้วถ่ายภาพที่กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 3.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

แหล่งที่มา:

https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/images/research_education/geochemsheets/techniques/UWSEM.jpg

บทที่ 4
ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของเยื่อ

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงของกระดาษเมื่อแช่ในของเหลวชนิดต่าง ๆ

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและกากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์เมื่อแช่ในของเหลวชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำเปล่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH9 pH10 และ pH11 เป็นเวลา 8 วันเท่า ๆ กัน เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่เยื่อกระดาษมีการแตกตัว เหมาะสมกับการเตรียมและนำไปใช้งานมากที่สุด ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของกากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์เมื่อแช่ในของเหลวต่าง ๆ ในวันแรกและวันที่ 8

กากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์		
ของเหลวที่ใช้แช่	ตอนเริ่มแช่	หลังแช่ครบ 8 วัน
น้ำเปล่า		
สารละลาย pH9		
สารละลาย pH10		
สารละลาย pH11		

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อแช่ในของเหลวต่าง ๆ ในวันแรกและวันที่ 8

กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว		
ของเหลวที่ใช้แช่	ตอนเริ่มแช่	หลังแช่ครบ 8 วัน
น้ำเปล่า		
สารละลาย pH9		
สารละลาย pH10		
สารละลาย pH11		

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการทดสอบแช่กากกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์และกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วในของเหลวต่าง ๆ เพื่อดูปริมาณเยื่อกระดาษที่ได้เมื่อแช่ครบ 8 วัน โดยผลที่ได้ พบว่า กระดาษที่แช่ในสารละลาย pH ต่าง ๆ มีเยื่อลอยอยู่ด้านบนผิวกระดาษมากกว่ากระดาษที่แช่ในน้ำเปล่า และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเยื่อที่อยู่ในสารละลาย pH ต่าง ๆ พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน ทำให้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าควรแช่กระดาษเพื่อเตรียมเยื่อสำหรับนำไปทำเปเปอร์ครีตที่สารละลาย pH ใด จึงต้องนำเยื่อที่ได้ไปทดสอบหาสมบัติด้วยเครื่องตรวจสอบคุณภาพเยื่อต่อไป

4.1.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยกระดาษที่ผ่านการแช่ในของเหลวชนิดต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Fiber Quality Analyzer แสดงดังตารางที่ 4.3

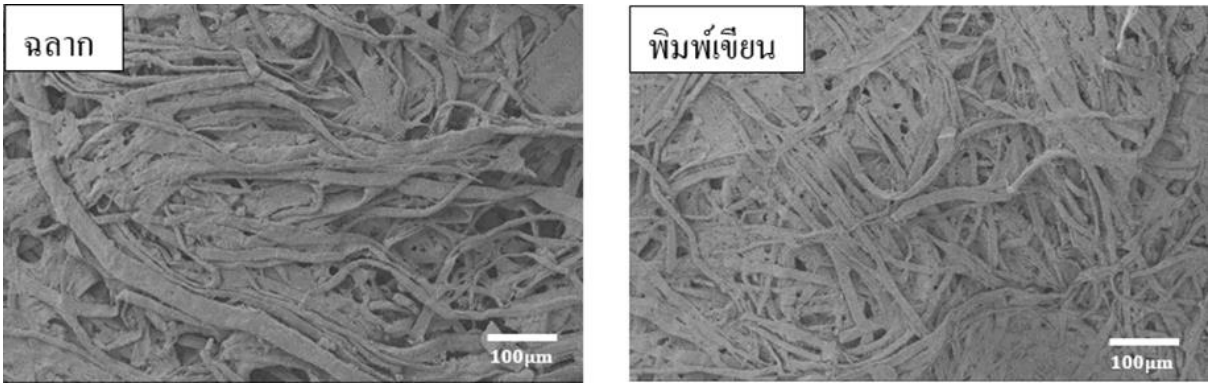
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์เส้นใยกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์ใช้แล้วเขียนโดยเฉลี่ย

ลักษณะ	เส้นใย	น้ำเปล่า	pH9	pH10	pH11
average fiber length (LN) [mm]	ฉลาก	0.549 ± 0.004	0.612 ± 0.009	0.609 ± 0.008	0.613 ± 0.002
	พิมพ์เขียน	0.612 ± 0.009	0.559 ± 0.002	0.561 ± 0.008	0.555 ± 0.002
length weighted average fiber length (LW) [mm]	ฉลาก	0.827 ± 0.029	0.812 ± 0.017	0.817 ± 0.012	0.818 ± 0.006
	พิมพ์เขียน	0.636 ± 0.008	0.650 ± 0.003	0.650 ± 0.012	0.638 ± 0.006
weight weighted average fiber length (LWW) [mm]	ฉลาก	1.275 ± 0.153	1.223 ± 0.056	1.242 ± 0.029	1.238 ± 0.015
	พิมพ์เขียน	0.730 ± 0.024	0.753 ± 0.020	0.746 ± 0.029	0.720 ± 0.015
Fine percent (<75 μm) [%]	ฉลาก	20.292 ± 0.728	20.449 ± 0.760	22.580 ± 0.724	21.490 ± 0.656
	พิมพ์เขียน	15.558 ± 1.188	15.777 ± 0.305	15.584 ± 0.724	15.093 ± 0.656
Mean curl	ฉลาก	0.118 ± 0.006	0.115 ± 0.003	0.120 ± 0.004	0.122 ± 0.001
	พิมพ์เขียน	0.098 ± 0.003	0.091 ± 0.002	0.093 ± 0.004	0.097 ± 0.001
Kink index	ฉลาก	1.690 ± 0.061	1.594 ± 0.026	1.653 ± 0.022	1.688 ± 0.035
	พิมพ์เขียน	1.386 ± 0.061	1.294 ± 0.026	1.289 ± 0.022	1.351 ± 0.035
Width [μm]	ฉลาก	22.350 ± 0.173	22.767 ± 0.252	22.700 ± 0.100	22.767 ± 0.173
	พิมพ์เขียน	22.033 ± 0.208	22.000 ± 0.000	22.300 ± 0.100	22.300 ± 0.173

ลักษณะเส้นใยส่งผลต่อสมบัติของกระดาษ สามารถสังเกตได้จากค่าความยาวเส้นใย (Fiber length) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ผสมอยู่ (Fine percent) ค่าเฉลี่ยความโค้งของเส้นใย (Mean curl) ดัชนีความหักของเส้นใย (Kink index) รวมถึงค่าความกว้างของเส้นใย (Width) จากตารางที่ 4.1 เมื่อสังเกตค่าความยาวเส้นเยื่อใยเฉลี่ย (LW) ซึ่งเป็นค่าที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์ความยาวเส้นใย จะเห็นได้ว่าเส้นใยฉลากมีความยาวมากกว่าเส้นใยกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว โดยความยาวเส้นใยฉลากมีค่าอยู่ในช่วง 0.81 - 0.83 มิลลิเมตร ส่วนในกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีค่าอยู่ในช่วง 0.63 - 0.65 มิลลิเมตร โดยฉลากมีปริมาณเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอนผสมอยู่ประมาณ 20 - 22% ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเส้นใยกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่มีเพียง 15 - 16% เท่านั้น และฉลากยังมีค่าเฉลี่ยความโค้งของเส้นใยอยู่ในช่วง

0.11 - 0.13 ในขณะที่ความโค้งเส้นใยในกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.09 - 0.10 ส่วนค่าดัชนีความหักของเส้นใยกระดาษฉลากมีค่าอยู่ระหว่าง 1.59 - 1.69 สูงกว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่มีค่าประมาณ 1.29 - 1.39 และค่าความกว้างของเส้นเยื่อในกระดาษฉลากมีค่าอยู่ในช่วง 22.35 - 22.77 ไมครอน มากกว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่มีค่าอยู่ที่ 22.00 - 22.30 ไมครอน

การแช่กระดาษในน้ำที่มีความเป็นด่างจะช่วยทำให้กระดาษอ่อนตัวได้เร็วขึ้นทำให้สามารถนำมาแปรรูปเป็นเยื่อกระดาษได้ง่ายขึ้น จากตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะเส้นใยของกระดาษที่แช่ในของเหลวที่มีค่า pH แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าความยาวเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ค่าเฉลี่ยความโค้งของเส้นใย ดัชนีความหักของเส้นใย รวมถึงค่าความกว้างของเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ได้จากของเหลวต่าง ๆ มีสมบัติใกล้เคียงกัน จึงเลือกสารละลาย pH 9 ที่มีความเป็นด่างมากกว่าน้ำเปล่า และสามารถเตรียมได้ง่ายกว่าสารละลายความเข้มข้นอื่น มาใช้ในการเตรียมเยื่อสำหรับทำเปเปอร์ครีต



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 150 เท่าของ เยื่อกระดาษฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

จากรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 150 เท่าของเยื่อฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว สังเกตได้ว่าเยื่อฉลากมีลักษณะของเส้นใยที่หนาและกว้างกว่า อีกทั้งยังมีการจัดเรียงตัวของเยื่อที่ไม่แน่นเท่าเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเส้นใยของกระดาษฉลากมีความโค้งและการหักงอมากกว่า รวมถึงอาจเป็นไปได้ว่าเส้นใยจากกระดาษฉลากมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่าเส้นใยจากกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว เนื่องจากผลของกาวที่ติดมากับกระดาษฉลาก ซึ่งสมบัติของเส้นใยที่ปรากฏย่อมส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษเมื่อนำเยื่อมาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษและนำเยื่อมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำเปเปอร์ครีต

4.1.3 สมบัติของเยื่อเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ

เป็นการนำเยื่อกระดาษที่แช่และปั่นผสมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH9 มาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ โดยกำหนดให้กระดาษมีน้ำหนักมาตรฐาน 80 ± 3 g/m^2

- **การซึมน้ำของกระดาษ (Water absorptiveness)**

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของเยื่อกระดาษฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อขึ้นรูปแผ่นกระดาษดังแสดงในตารางที่ 4.4 สังเกตได้ว่ากระดาษทั้ง 2 ชนิดมีความสามารถในการดูดซึมน้ำแตกต่างกัน โดยกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วสามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่ากระดาษฉลาก ซึ่งกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 10.97 g/m^2 และกระดาษฉลากมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 9.26 g/m^2 ซึ่งไม่สอดคล้องกับสมบัติที่ทดสอบด้วยเครื่อง FQA ในตารางที่ 4.2 ที่กระดาษฉลากควรจะดูดซึมน้ำได้มากกว่า เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากกว่า ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวมากกว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว แต่ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากกระดาษฉลากเป็นวัสดุที่ชะล้างมาจากบรรจุภัณฑ์ ทำให้มีกาวหลงเหลืออยู่ ซึ่งจะทำให้ฉลากมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงดูดซึมน้ำได้น้อยกว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

สมบัติ	ฉลาก	พิมพ์เขียนใช้แล้ว
Before weight (g.)	1.34 ± 0.01	1.36 ± 0.03
Final weight (g.)	2.78 ± 0.07	3.06 ± 0.17
Water absorptiveness (g/m^2)	9.26 ± 0.53	10.97 ± 0.93

- **ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)**

ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของเยื่อฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ แสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่ากระดาษฉลาก สังเกตจากค่า Tensile strength ของกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่มีค่า 2.89 kN/m ซึ่งมากกว่ากระดาษฉลากที่มีค่า 2.73 kN/m แสดงว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีการประสานกันของพันธะเส้นใยได้ดีกว่ากระดาษฉลาก เพราะแม้กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วจะมีความยาวของเส้นใยน้อยกว่า รวมถึงไม่มีเศษกาวเหลืออยู่อย่างกระดาษฉลาก โดยรวมเลยทำให้กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย

มากกว่าเมื่อขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ ทำให้กระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากระดาษฉลาก

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

สมบัติ	ฉลาก	พิมพ์เขียนใช้แล้ว
แรง (N)	41.000 ± 4.037	43.350 ± 3.083
ระยะยืด (mm.)	2.600 ± 0.781	2.150 ± 0.370
Tensile strength (kN/m)	2.733 ± 0.269	2.890 ± 0.206
Percent stretch (%)	2.600 ± 0.781	2.150 ± 0.370
Tensile index (Nm/g.)	34.167 ± 3.364	36.125 ± 2.569
Breaking length (m)	3485 ± 343.103	3684.750 ± 262.034

- **ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)**

ผลการทดสอบความต้านทานแรงฉีกในกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ แสดงดังตารางที่ 4.6 ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษทั้ง 2 ชนิดมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก สังเกตดังตารางที่ 4.6 พบว่ากระดาษฉลากมีค่าความต้านทานแรงฉีกมากกว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว โดยในกระดาษฉลากมีค่าความต้านทานแรงฉีกสูงถึง 1055.198 mN ส่วนในกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีค่าอยู่ที่ 737.460 mN สอดคล้องกับสมบัติของเส้นใยในตารางที่ 4.2 ที่ระบุว่าเส้นใยฉลากมีความยาวมากกว่าเส้นใยกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว ประกอบกับภายในกระดาษฉลากมีกาวเจือปนอยู่ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสริมแรงให้กระดาษฉลาก ทำให้มีค่าความต้านทานแรงฉีกสูงกว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.6 ผลความต้านทานแรงฉีกของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

สมบัติ	ฉลาก	พิมพ์เขียนใช้แล้ว
Tear resistance (mN)	1055.198±83.215	737.460±83.212
Tear index ($mN.m^2/g.$)	13.190±9.218	9.218±0.000

เมื่อทำการพิจารณาสมบัติในแต่ละด้านของกระดาษทั้ง 2 ชนิดเมื่อนำมาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น พบว่าหากต้องการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตเปเปอร์ครีต กระดาษฉลากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตเปเปอร์ครีตมากกว่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว เนื่องจากมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่า ค่าความต้านทางแรงฉีกที่มากกว่า ส่วนค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมาก

4.2 การวิเคราะห์การเตรียมเปเปอร์ครีต

4.2.1 อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทราย

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์และทรายที่เหมาะสมจากงานวิจัยที่ผ่านมา สำหรับนำไปใช้ในการเตรียมเปเปอร์ครีต จากตารางที่ 4.7 จะสังเกตได้ว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานมากที่สุดมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายอยู่ที่ 0.75 : 1 ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงถึง 15.10 MPa โดยเฉลี่ย และมีการกระจายของข้อมูลเท่ากับ 1.92

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์และทรายในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่เลือกมาจากงานวิจัยที่ผ่านมา

Cement : Sand	Super plasticizer (% by weight of cement)	Water/Cement ratio	Average compressive Strength (MPa)
1 : 1.9	-	0.41	11.04±1.57
1 : 1	1.5	0.35	10.68±3.93
0.75 : 1	1.5	0.35	15.10±1.92

4.2.2 ปริมาณสารเพิ่มการไหลตัว

จากตารางที่ 4.8 แสดงการทดลองเปรียบเทียบปริมาณสารเพิ่มในการไหลตัวของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 ที่บ่มเป็นระยะเวลา 3 วัน พบว่าการเติมสารเพิ่มการไหลตัว 0.5% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย 15.10 MPa ซึ่งมีค่าสูงเป็นอันดับ 2 เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.92 แสดงถึงค่าการทดสอบของชิ้นงานมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอกัน ต่างจากสูตรที่เติมสารเพิ่มการไหลตัว 1 % ที่มีค่าความต้านทานกำลังอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น แต่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงถึง 6.75 แสดงว่ามีการกระจายของค่าการทดสอบมาก

ส่วนการเติมสารเพิ่มการไหลตัวที่ 1.5% และ 2% ส่งผลต่อการบวมและแตกร่อนของเปเปอร์ครีต ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสูตรที่มีอัตราส่วน 0.75 : 1 ที่มีปริมาณสารเพิ่มการไหลตัว 0.5 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์และกำหนดอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาเตรียมเป็นเปเปอร์ครีต

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่มีสารช่วยไหลตัวในปริมาณต่าง ๆ

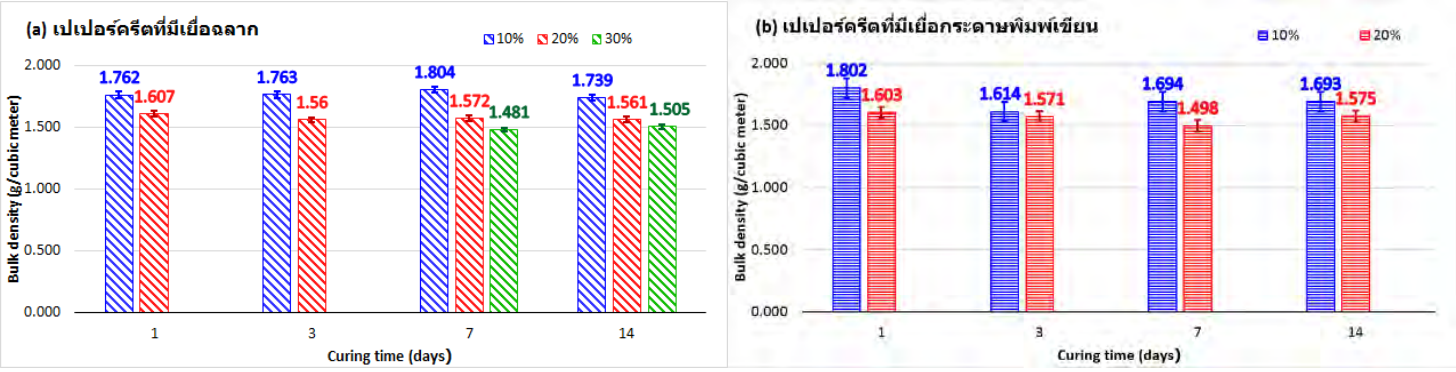
Cement : Sand	Water/Cement ratio	Super plasticizer (% by weight of cement)	Average compressive Strength (MPa)
0.75 : 1	0.35	0.5	11.51±1.11
0.75 : 1	0.35	1	15.90±6.75
0.75 : 1	0.35	1.5	15.10±1.92
0.75 : 1	0.35	2	12.64±2.50

4.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของเปเปอร์ครีต

ในงานวิจัยนี้มีการทดลองการขึ้นรูปเปเปอร์ครีตโดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ : ทรายเท่ากับ 0.75 : 1 รวมถึงมีการเติมสารช่วยเพิ่มการไหลตัว 0.5% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีการผสมเยื่อฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วในอัตราส่วนต่าง ๆ จากนั้นนำเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้ไปทำการทดสอบคุณสมบัติ

4.3.1 ความหนาแน่น

(ก) ผลของระยะการบ่ม

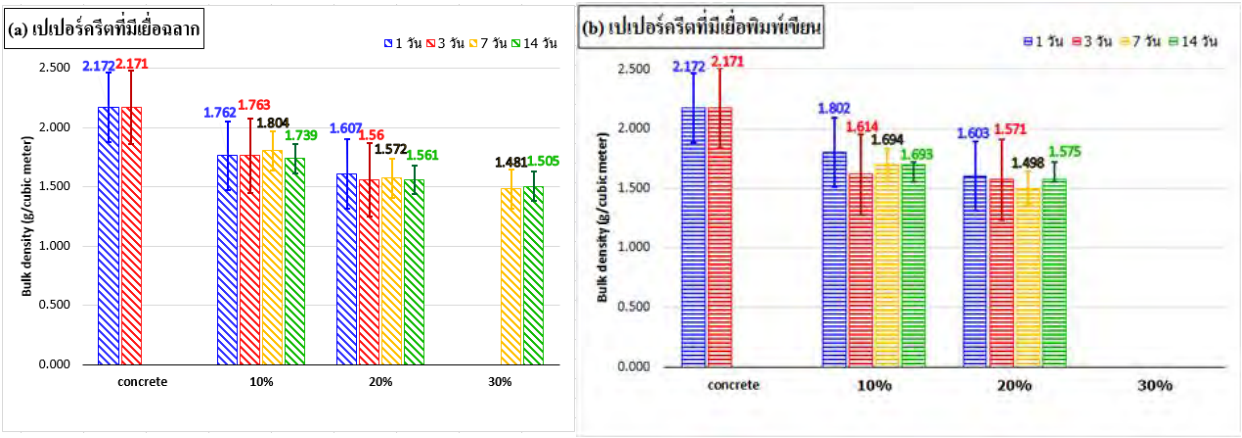


รูปที่ 4.2 แผนภูมิเปรียบเทียบความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตเมื่อผสมเยื่อกระดาษในสัดส่วน 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน (a) เปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษฉลาก (b) เปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเยื่อกระดาษทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้เปเปอร์ครีตมีแนวโน้มความหนาแน่นของชิ้นงานที่ลดลง ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือชิ้นงานที่ผสมเยื่อกระดาษ 10% โดยน้ำหนัก รองลงมาจะเป็น 20% และ 30%โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากเยื่อกระดาษมีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์มาก ทำให้ความหนาแน่นลดลงเมื่อมีปริมาณของเยื่อกระดาษที่เข้ามาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในเปเปอร์ครีตเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของเปเปอร์ครีต พบว่าเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลากมีค่าความหนาแน่นมากกว่าเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อกระดาษพิมพ์เขียน

ส่วนผลการวิเคราะห์ของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษ 30%โดยน้ำหนักที่ไม่ได้รายงานผลของเปเปอร์ครีตผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วนั้น เนื่องจากเปเปอร์ครีตไม่สามารถเซ็ตตัวแม้ทิ้งไว้ในระยะเวลานาน สอดคล้องกับสมบัติของเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่มีการดูดซึมน้ำมาก ทำให้เยื่อกักเก็บน้ำเอาไว้มากและเหลือน้ำไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนน้อยลง จึงเกิดผลิตภัณฑ์ที่จะมาช่วยเสริมแรงให้กับเปเปอร์ครีตน้อยลง ส่งผลให้เซ็ตตัวช้ากว่าเปเปอร์ครีตผสมเยื่อกระดาษฉลาก จึงไม่สามารถนำมาทดสอบและวิเคราะห์ผลได้

(ข) ผลของสัดส่วนเยื่อกระดาษ



รูปที่ 4.3 แผนภูมิเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตปกติกับเปเปอร์ครีตมีที่เยื่อกระดาษผสมอยู่ 10 20 และ 30%โดยน้ำหนัก ที่บ่มเป็นระยะเวลา 1 3 7 และ 14 วัน (a) เปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษฉลาก (b) เปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานน้อยลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเยื่อ กระดาษในเปเปอร์ครีต และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติพบว่าเปเปอร์ครีตมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตปกติมาก และลดลงมากขึ้นเมื่อมีอัตราการผสมเยื่อกระดาษมากขึ้น สังเกตได้จากเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากปริมาณ 30%โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติอย่างเห็นได้ชัด ไม่ว่าจะเป็นระยะเวลาการบ่มที่ 1 3 7 หรือ 14 วัน

เนื่องจากสถานการณ์โควิด-19 ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองต่อไปได้ จึงสรุปผลที่คาดว่าจะได้รับในส่วนของการทดลองผสมคอนกรีตปกติที่ยังไม่ได้ดำเนินการผสมและบ่มให้ครบ 7 และ 14 วัน จากการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานในสูตรเดียวกัน จะเห็นว่ามีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันในทุกวันบ่ม ดังนั้น คอนกรีตปกติที่บ่มเป็นระยะเวลา 7 และ 14 วัน น่าจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับคอนกรีตที่บ่ม 1 และ 3 วัน

4.3.2 ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

จากตารางที่ 4.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างคอนกรีตและเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าคอนกรีตปกติมีปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่การบ่ม 7 วัน โดยมีปริมาตรเพิ่มขึ้น 0.42% ส่วนเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

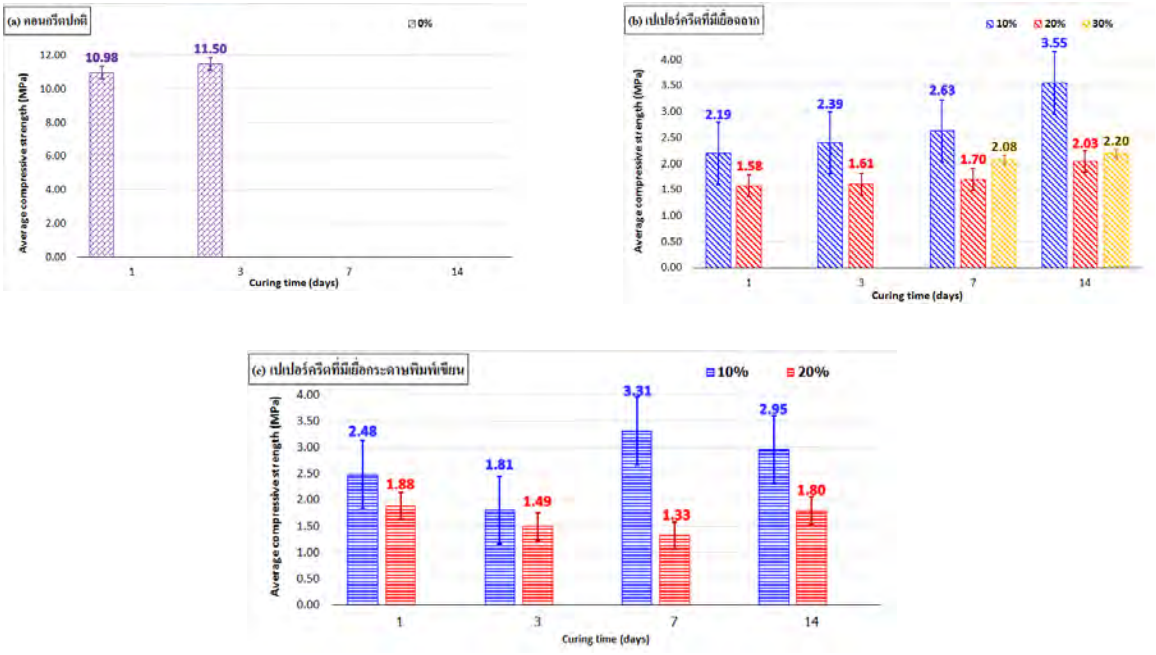
10%โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากที่สุดที่การบ่ม 1 วัน โดยเกิดการหดตัวถึง 3.05% หลังการบ่ม และเมื่อเทียบกับเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อฉลากในสูตรและวันบ่มเดียวกัน พบว่ามีการหดตัวเพียง 1.09% และในเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อพิมพ์เขียนใช้แล้ว 20%โดยน้ำหนัก พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากที่สุดที่การบ่ม 7 วัน โดยเกิดการขยายตัว 1.81% หลังบ่ม เทียบกับเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลาก พบว่าเกิดการขยายตัวหลังบ่มเพียง 0.07% เท่านั้น ส่วนเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 30%โดยน้ำหนัก นั้น ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เนื่องจากชิ้นงานมีการเซ็ตตัวช้าจนไม่สามารถนำมาทดลองได้

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเฉลี่ยของคอนกรีตปกติและเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อกระดาษผสมอยู่ในปริมาณต่าง ๆ หลังบ่มเป็นระยะเวลา 1 3 7 และ 14 วัน

Curing time (days)	คอนกรีต	ฉลาก		พิมพ์เขียนใช้แล้ว	
		10%	20%	10%	20%
1	N/A	-1.09 ± 0.02	0.00 ± 0.01	-3.05 ± 0.08	0.58 ± 0.01
3	N/A	-3.05 ± 0.01	-0.56 ± 0.01	-0.37 ± 0.01	1.50 ± 0.01
7	0.42	0.91 ± 0.03	0.07 ± 0.01	-0.29 ± 0.01	1.81 ± 0.01
14	-0.07	-1.13 ± 0.01	0.27 ± 0.02	-0.84 ± 0.01	-1.45 ± 0.02

จากการที่ปริมาตรลดลงหรือเพิ่มขึ้นและเกิดการหดตัวหรือขยายตัวของชิ้นงาน เนื่องจากภายในเปเปอร์ครีตมีรูพรุนในโครงสร้าง ประกอบกับการบ่มเป็นระยะเวลานาน ทำให้น้ำจากการบ่มแทรกซึมเข้าไปได้มาก เมื่อออกมาเจออากาศทำให้น้ำระเหยออกมา ส่งผลปริมาตรเปลี่ยนแปลงได้ และจากการทดสอบสมบัติเยื่อทำให้ทราบว่าเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วสามารถกักเก็บน้ำไว้กับตัวได้มาก ทำให้เหลือพื้นที่ว่างให้น้ำจากการบ่มแทรกซึมเข้ามาได้อีกจนเกิดการบวมของชิ้นงานและเมื่อชิ้นงานออกมาเจออากาศภายนอก น้ำบางส่วนจะระเหยออกมา แต่ยังคงหลงเหลือน้ำที่อยู่ในเยื่อ ทำให้ชิ้นงานยังคงบวมอยู่ ทำให้ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลากที่มีสมบัติการดูดซึมน้ำน้อยกว่าเนื่องจากมีกาวเคลือบที่ผิวฉลากทำให้เกิดความไม่ชอบน้ำขึ้น

4.3.3 ความต้านทานกำลังอัด



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานที่มีการเติมเยื่อกระดาษแต่ละชนิดในสัดส่วน 0% 10% 20% และ 30%โดยน้ำหนัก ที่บ่มเป็นระยะเวลา 1 3 7 และ 14 วัน (a) คอนกรีตปกติ (b) เยื่อกระดาษฉลาก (c) เยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าความสามารถในการต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ พบว่า ทั้งในคอนกรีตปกติและเปเปอร์ครีตนั้นมีค่าความต้านทานกำลังอัดมากขึ้นตามระยะเวลาบ่ม เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดของเปเปอร์ครีตกับคอนกรีตปกติ พบว่าเปเปอร์ครีตสามารถรับแรงอัดได้น้อยกว่าคอนกรีตปกติมาก สอดคล้องกับความหนาแน่นที่ลดลงของเปเปอร์ครีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยในระยะเวลาการบ่ม 1 วัน คอนกรีตปกติมีค่าความสามารถในการต้านทานกำลังอัดสูงถึง 10.98 MPa ส่วนในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 10%โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเหลือเพียง 2.19 MPa และ 2.48 MPa ตามลำดับ ส่วนที่ระยะเวลาการบ่ม 3 7 และ 14 วัน ความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตเทียบกับคอนกรีตปกติก็มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน

ความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตมีแนวโน้มลดลงจากค่าที่ได้จากคอนกรีตปกติ และลดลงมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเยื่อกระดาษมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shukeri และ Ghani [30] ที่กล่าวว่าปริมาณของกระดาษเสียที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง

จากตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเยื่อกระดาษในเปเปอร์ครีต ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงอัดลดลง โดยเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษ 10% มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษในอัตราส่วนอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบการผสมเยื่อกระดาษแต่ละชนิดในอัตราส่วนเดียวกัน พบว่า เปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อฉลากมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด 3.55 MPa เมื่อบ่มเป็นเวลา 14 วัน ส่วนในเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด 3.31 MPa เมื่อบ่มครบ 7 วัน และในการผสมเยื่อกระดาษ 20%โดยน้ำหนัก เปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด 2.03 MPa เมื่อบ่มเป็นเวลา 14 วัน ส่วนในเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด 1.88 MPa เมื่อบ่มครบ 1 วัน ซึ่งเห็นได้ว่าเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากมีแนวโน้มของค่าความต้านทานกำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม เป็นผลมาจากโครงสร้างของเยื่อกระดาษฉลากที่มีการจัดเรียงตัวไม่แน่นเท่ากระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว เมื่อนำมาผสมลงในเปเปอร์ครีตจะทำให้เกิดการแตกตัวผสมกับปูนได้ง่ายและเยื่อฉลากยังมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้กักเก็บน้ำไว้กับตัวในปริมาณน้อย จึงเหลือน้ำไปทำปฏิกิริยากับปูนได้มากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป ส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ต่างจากในเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่มีความชอบน้ำมากกว่า ทำให้เหลือน้ำที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ส่งผลต่อค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้

ส่วนในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษ 30%โดยน้ำหนัก มีเพียงเปเปอร์ครีตผสมเยื่อกระดาษฉลากที่สามารถนำมาทดสอบได้ เนื่องจากเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วไม่สามารถเซ็ตตัวในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานกำลังอัดในชิ้นงานเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อ 30%โดยน้ำหนักแล้วพบว่า มีค่าความต้านทานกำลังอัดสูงกว่าที่ผสม 20%โดยน้ำหนัก ทั้งในระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน โดยมีค่าสูงสุดที่วันบ่ม 14 วัน เป็นผลมาจากภายในเยื่อกระดาษฉลากมีส่วนผสมของกาวเคลือบอยู่ที่ผิวเยื่อ ทำให้พันธะระหว่างเยื่อประสานกันไม่แน่น เมื่อผสมกับปูนจะทำให้ปูนแทรกเข้ามาในโครงสร้างเยื่อได้มาก ส่งผลให้เปเปอร์ครีตสามารถรับแรงอัดได้มาก

จากผลการทดสอบ พบว่าเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้มีค่าความต้านทานกำลังอัดมากกว่าผลจากงานวิจัยของ Saurabh และคณะ [29] ในสูตรที่ใกล้เคียงกัน โดยพบว่าเปเปอร์ครีตที่มีอัตราส่วน กระดาษ : ปูน : ทราย เท่ากับ 1 : 2 : 3 W/C ratio เท่ากับ 3 มีค่าความต้านทานกำลังอัดเท่ากับ 1.44 MPa เมื่อบ่มเป็นเวลา 28 วันเปรียบเทียบกับเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้จาก

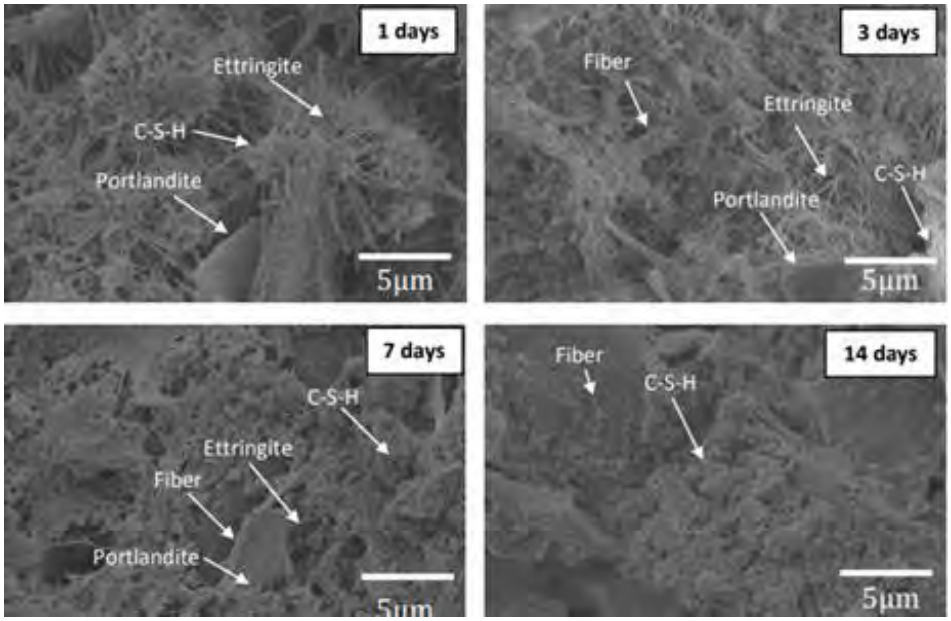
งานวิจัยนี้ในสูตรที่มีอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio เท่ากับ 0.35 และผสมเยื่อกระดาษ 20%โดยน้ำหนัก หรือมีอัตราส่วนของกระดาษต่อปูนเท่ากับ 0.47 : 1 ดังนั้นจะมีอัตราส่วนของกระดาษ : ปูน : ทราย เท่ากับ 0.47 : 1 : 1.25 มีค่าความต้านทานกำลังอัด 2.03 MPa ในสูตรที่มีเยื่อฉลากและ 1.80 MPa ในสูตรที่มีเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วหลังบ่ม 14 วัน ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Saurabh

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบทดสอบความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษฉลากและเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วในสัดส่วน 10% 20% และ 30%โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน

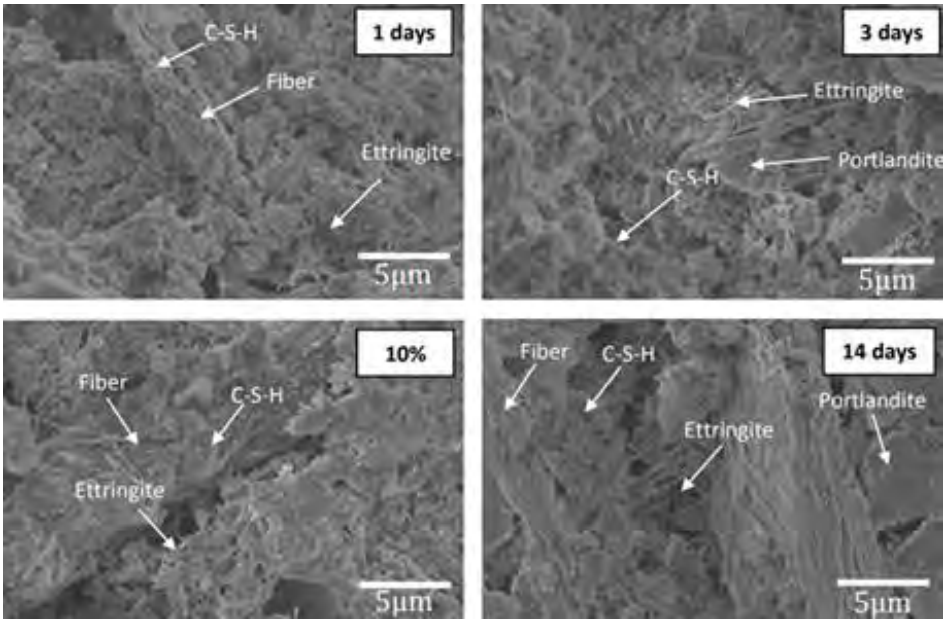
Fiber (% by total weight)	**Curing Day**	**ฉลาก (MPa)**	**พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)**
10	1	2.19 ± 0.18	2.48 ± 0.10
	3	2.39 ± 0.16	1.81 ± 0.05
	7	2.63 ± 0.14	3.31 ± 0.05
	14	3.55 ± 0.17	2.95 ± 0.21
20	1	1.58 ± 0.37	1.88 ± 0.26
	3	1.61 ± 0.08	1.49 ± 0.02
	7	1.70 ± 0.08	1.33 ± 0.06
	14	2.03 ± 0.04	1.80 ± 0.08
30	7	2.08 ± 0.50	N/A
	14	2.20 ± 0.38	N/A

4.3.4 โครงสร้างจุลภาคของเปเปอร์ครีต

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเปเปอร์ครีตจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก 10%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน

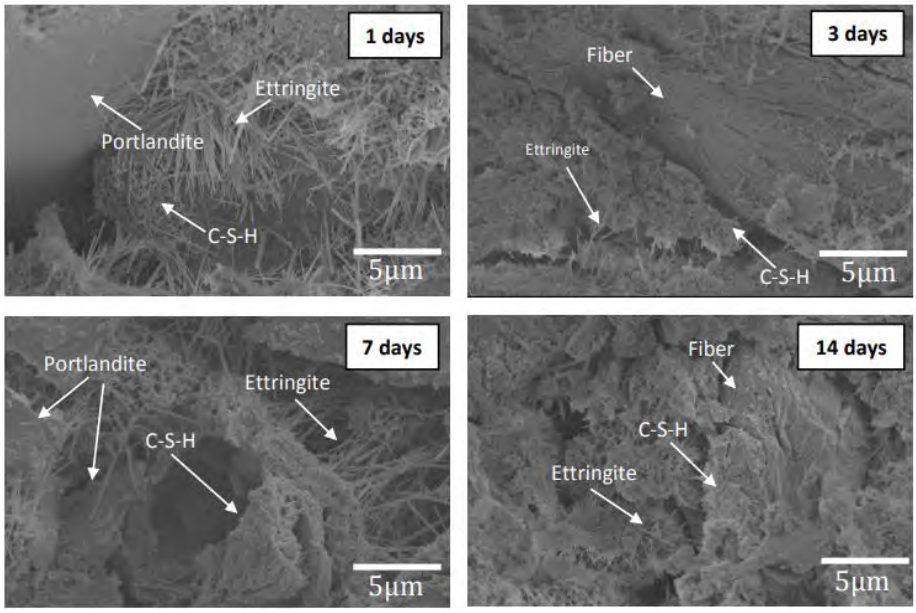


รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 10% ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน

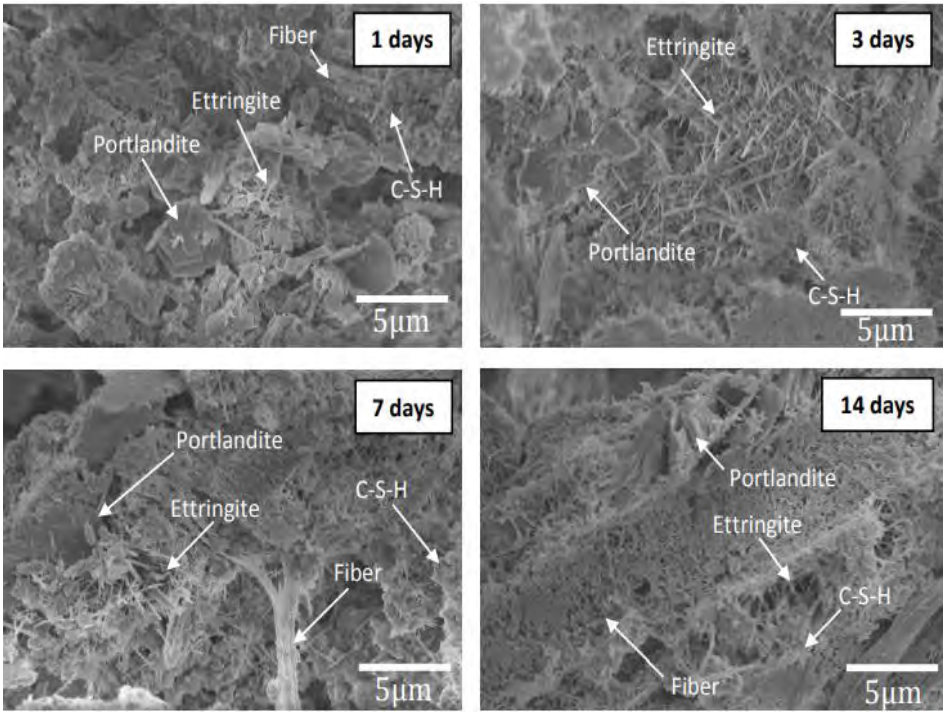
จากรูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อฉลาก 10 %โดยน้ำหนัก พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน เกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์ (Ettringite) มาก แต่เมื่อบ่มด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นจะเกิดผลึกเข็มของเอททริงไกต์น้อยลง แต่ในทางกลับกันมีการเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ปกคลุมโครงสร้างอยู่มาก ทำให้มองเห็นปริมาณของเส้นใยได้น้อยลงในระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น สังเกตจากระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่ามีการเกิด CSH ปริมาณมากเคลือบอยู่บริเวณเส้นใย ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน ส่งผลให้มีเปเปอร์ครีตความหนาแน่นสูงขึ้นและสามารถรับกำลังอัดได้มากกว่าที่ระยะเวลาการบ่มอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบผลึกต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น พอร์ตแลนไดต์ (CH) กระจายอยู่บางส่วน

จากรูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 10 %โดยน้ำหนักพบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน มีการเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์น้อยมากเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลาการบ่มอื่น ๆ แต่กลับพบ CSH จำนวนมากเกาะอยู่บริเวณเส้นใย ส่วนที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน พบผลึกเข็มเอททริงไกต์อยู่บริเวณใกล้กับ CSH และยังพบร่วมกับ CH และที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบกลุ่มผลึกเข็มเอททริงไกต์และ CSH จำนวนมาก ส่วนที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบผลึกเข็มเอททริงไกต์เล็กน้อยใกล้กับ CSH และบริเวณเส้นใย นอกจากนี้ยังพบ CH ร่วมด้วย

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษ 10% โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าในเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษฉลากที่ระยะเวลาบ่มน้อยจะเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์มากกว่าที่บ่มในระยะเวลานาน สังเกตได้จากระยะเวลาการบ่มที่ 1 3 7 และ 14 วัน แต่มีการเกิด CSH มากขึ้นเมื่อบ่มนานขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานแรงอัดสูงขึ้น ต่างจากเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว พบว่าในระยะเวลาการบ่ม 1 วันนั้น ไม่พบการเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์ แต่จะพบผลึกเข็มเอททริงไกต์ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วันมากที่สุด รองลงมาคือ 7 และ 14 วัน ตามลำดับ ซึ่งส่วนมากจะพบเอททริงไกต์เกิดร่วมกับ CSH โดยในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน เกิด CSH มากที่สุดและพบ CH อยู่มาก ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูงที่สุด



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก 20%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน

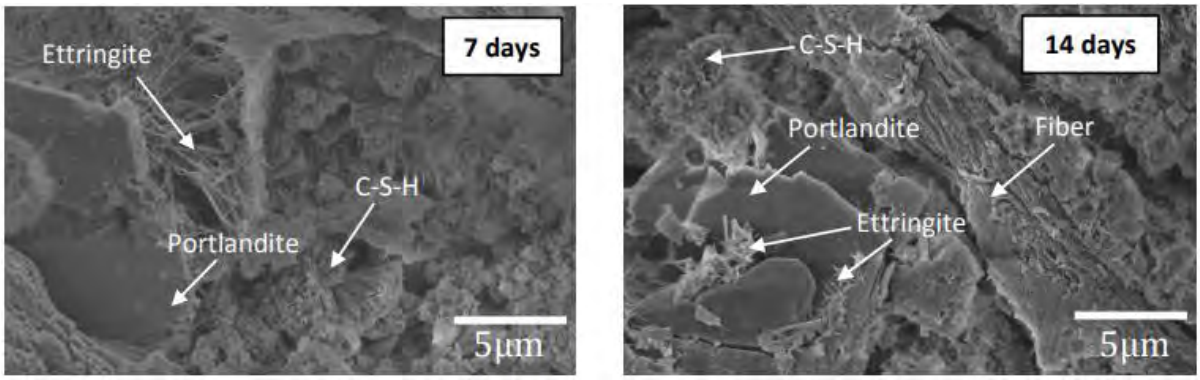


รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 20%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 1 3 7 และ 14 วัน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก 20%โดยน้ำหนัก มีการเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์มากที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน และเกิดน้อยลงที่ระยะเวลาการบ่ม 3 7 และ 14 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการพบ CSH มากขึ้นเมื่อบ่มนานขึ้น โดยส่วนมากพบที่บริเวณเส้นใย ส่งผลให้มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ระยะการบ่ม 14 วัน

จากรูปที่ 4.8 พบว่าในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 20%โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน มีการเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระยะเวลาการบ่มอื่น ๆ แต่พบ CSH มาก ทั้งยังเจอผลึกของ CH ร่วมด้วย ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานกำลังอัดสูงกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 3 และ 7 วัน สำหรับที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันพบผลึกเข็มเอททริงไกต์ร่วมกับ CH และ CSH ที่บริเวณเส้นใย ส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานกำลังอัดได้มากกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 3 และ 7 วัน

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษ 20% โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการผสมเยื่อกระดาษ 10 %โดยน้ำหนัก โดยในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก 20%โดยน้ำหนัก มีการเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์มากที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน และมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่ม ในทางกลับกันจะพบเฟสของ CSH มากขึ้นเมื่อบ่มนานขึ้น ส่วนในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 20%โดยน้ำหนัก มีการเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อบ่มในระยะเวลานาน ส่วนผลึกของ CSH และ CH พบว่ามีปริมาณมากที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน



รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าของเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก 30%โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก 30 % โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน พบผลึกเข็มเอททริงไกต์เกิดร่วมกับ CH และ CSH ส่วนที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วันนั้นพบว่ามีการเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์เพียงเล็กน้อยแต่เกิดร่วมกับ CH และ CSH ซึ่งมีจำนวนมาก โดยส่งผลต่อค่าความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานแรงอัดของเปเปอร์ครีต

สำหรับเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลาก 30%โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 และ 3 วัน คาดว่ามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อฉลาก 10%โดยน้ำหนัก และ 20%โดยน้ำหนัก คือเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์มากที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน และเกิดน้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม ส่วน CSH มีแนวโน้มการเกิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่ม ส่งผลให้เปเปอร์ครีตที่บ่มเป็นระยะเวลา 1 วันมีความแข็งแรงน้อยกว่าการบ่มที่ระยะเวลา 3 วัน

จากการเปรียบเทียบการผสมเยื่อกระดาษในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน เกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์มากที่สุด รองลงมาคือที่ระยะเวลาบ่ม 3 7 และ 14 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบผลึกของ CH และ CSH ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรง โดยพบผลึกเหล่านี้มากขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ส่งผลให้ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วันเปเปอร์ครีตมีความสามารถในการต้านทานแรงอัดมากที่สุด รองลงมาคือที่ระยะเวลาบ่ม 7 3 และ 1 วัน ตามลำดับ สอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างของเยื่อกระดาษฉลากที่มีการจัดเรียงตัวไม่แน่นและมีความไม่ชอบน้ำ ทำให้ปูนสามารถดึงน้ำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ง่าย ส่วนในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วจะเริ่มเกิดผลึกเข็มเอททริงไกต์มากที่สุดที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน รองลงมาคือที่ 7 และ 14 วัน ตามลำดับและที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน มีการเกิด CSH จำนวนมาก ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานแรงอัด แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานแรงอัดในชิ้นงานกลับพบว่าไม่ได้มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คาดว่าเป็นผลมาจากเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่โครงสร้างของเยื่อมีความชอบน้ำ ทำให้มีการดึงน้ำมาไว้ที่ตัวมาก ส่งผลให้เหลือน้ำในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง สังเกตได้จากโครงสร้างจุลภาคของเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการบวมของเส้นใยมากกว่าในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษฉลากที่วันบ่มเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความชอบน้ำของกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงและการต้านทานแรงอัด โดยเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว 10 %โดยน้ำหนัก ที่ระยะการบ่ม 7 วัน มีการเกิดเฟสของ

CSH จำนวนมาก ทำให้มีความแข็งแรงมากที่สุด ส่วนเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษฉลาก 20 % โดยน้ำหนัก พบว่าที่ระยะการบ่ม 14 วัน เกิดการเชื่อมประสานระหว่างผลึกเข็มเอททริงไกด์ CSH และ CH ทำให้เปเปอร์ครีตมีความแข็งแรงมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมเยื่อกระดาษ 10%โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณเยื่อกระดาษที่น้อยที่สุดในการนำมาทำเปเปอร์ครีต ทำให้มีปริมาณปูนในเปเปอร์ครีตมากกว่าสูตรอื่น จึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนและน้ำได้มาก ส่งผลให้โครงสร้างภายในมีความแข็งแรงมากกว่าเปเปอร์ครีตที่ผสมเยื่อกระดาษ 20 %โดยน้ำหนัก

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. เยื่อกระดาษฉลากมีความยาวของเส้นใยมากกว่าแต่มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากกว่าเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว ด้วยเหตุนี้เยื่อกระดาษฉลากจึงมีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยกว่าแต่มีความต้านทานแรงฉีกมากกว่าเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว
2. เยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วมีความชอบน้ำมากกว่าเยื่อกระดาษฉลาก ทำให้มีการดูดซึมน้ำมาก โดยส่งผลต่อความแข็งแรงของเปเปอร์ครีต ทำให้เหลือน้ำไปเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลง
3. เยื่อกระดาษฉลากมีการจัดเรียงตัวไม่แน่นเท่าเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้วและมีกาวเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ในเปเปอร์ครีตที่มีการผสมเยื่อฉลากมีความแข็งแรงมากกว่า
4. การผสมเยื่อกระดาษในเปเปอร์ครีตทำให้มีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตปกติประมาณ 20-30% จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้งานในลักษณะเดียวกับคอนกรีตมวลเบา
5. เปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลากเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานมากกว่าเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อพิมพ์เขียนใช้แล้ว เช่น การนำมาทำเป็นคอนกรีตมวลเบา ใช้เป็นผนังกั้นห้องภายในอาคาร เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตปกติ มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยและมีกำลังอัดที่สูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรวัดค่ามุมสัมผัสของเส้นใยของเยื่อกระดาษทั้งสองชนิด รวมถึงวัดมุมสัมผัสของกระดาษที่เตรียมได้ ทั้งนี้เพื่อดูค่าความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำของเส้นใยทั้งสองชนิดและของกระดาษที่เตรียมได้
2. ทดลองศึกษาสมบัติความทนไฟและการดูดซึมน้ำของเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้
3. ทดลองบ่มเปเปอร์ครีตโดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน
4. ทดลองเพิ่มวัตถุดิบผสมที่ใช้ผลิตเปเปอร์ครีต เช่น มวลรวมหยาบ มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเปเปอร์ครีตที่ผลิตได้

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทรัพยากรธรณี. (2544). ธรณีวิทยาประเทศไทย เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542. กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

[2] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2539). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด.

[3] บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรมจำกัด Siam Cement Industry Co., Ltd., Cement and Applications. ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน, ISBN: 974-92652-4-6, หน้า 25

[4] บริษัท ดั๊บเบิ้ล เอ (1991) จำกัด (มหาชน). กระบวนการผลิต [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: http://market.sec.or.th/public/ipos/IPOSGetFile.aspx?TransID=76856&TransFileSeq=8

[5] สุจริตรา สื่อประสาร. (2553) โครงการวิจัยเรื่อง เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับการใช้งานกระดาษเวียนทำใหม่ในการพิมพ์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางถ่ายและเทคโนโลยีการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[6] พิวัส สุขณียุทธและคณะ. ผลของชนิดเส้นใยต่อสมบัติกระดาษและสภาพพิมพ์ได้. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางถ่ายและเทคโนโลยีการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 759-768.

[7] ทิพวรรณ บุณย์เพิ่ม. (2007). วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การจัดการสมัยใหม่ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช: 134-141.

[8] วันชัย ศิริชนะ. ชนิดของกระดาษ [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: http://www.infinityprinting.co.th/main/content.php?page=sub&category=20&id=53

[9] วิจิตอัจฉรา สรรพกิจจำนงและคณะ. (2545). การก่อสร้างและประเมินความแข็งแรงของผิวถนนคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ด้วยวิธีบดอัด. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง.

[10] สมนึก ตั้งเติมสิริกุล. (2542). การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.).

[11] สมชาติ รุ่งอินทร์. การบ่งชี้ความขาวของกระดาษ [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2532_119_p20-21.pdf

[12] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2532). มอก. 80 เล่ม 1 - 2532 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ.

[13] หงส์ไทย. นวัตกรรมเยื่อกระดาษที่ใช้ในงานผลิตบรรจุภัณฑ์ [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://hongthaipackaging.com/blog/pulp-innovation/

[14] อาทิตยา. (2561). เครื่องติดฉลากขวด เทคนิคการเลือกใช้สติกเกอร์ ให้เหมาะกับบรรจุภัณฑ์ [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://1th.me/HYj2g

[15] Abishek, G. L. 2017. “Experimental Study on Behaviour of Paper Sludge Concrete”. Institute of Integrative Omics and Applied Biotechnology Journal. 8 (3): 73-78.

[16] Aciu C., Iluyiu Varvara D. A., Cobirzan N. and Balog A. “Recycling of paper waste in the composition of plastering mortars”. Cluj-Napoca, Romania. (2013)

[17] Ahmad Sajad, Malik M. Iqbal, Wani Muzaffar Bashir, and Ahmad Rafiq. 2013. Journal of Engineering (IOSRJEN). 3(11): 6-15.

[18] Bezerra, U., Martinelli, A., Melo, D., Melo, M., & Oliveira, V. (2011). The strength retrogression of special class Portland oilwell cement. Ceramica, 57(342), 150-154.

[19] Design 365. ประเภทของกระดาษมีอะไรบ้าง [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://1th.me/5ldDJ

[20] Double A. 2013. สมบัติของกระดาษ (1) [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://www.doubleapaper.com/th/assets/media/paperknowledge/paper_properties1.pdf.

[21] Gorgis Iqbal N., Zaki H. M. and Salih S. A. 2017. “Properties of Papercrete”. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 12(24): 7400-7412.

[22] Grosse, C. U. (2007). Advances in Construction Materials 2007: Springer Berlin Heidelberg.

[23] Jil Tusher Sheth and Saransh Joshi. Paper Crete: A Sustainable Building Material. Strategic Technologies of Complex. Gujarat,india. (2015)

[24] Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. Construction and Building Materials, 25(11), 4095-4104.

[25] Martin jadams. 2016. How Can I Make Papercrete? [cited 2019 April 12]. Available from: http://makepapercrete.com/.

[26] Mishra P.K., Anupam Sharma, and Punit Dashore. 2015. “Utilization of Paper Waste in Concrete”. International Journal for Scientific Research and Development. 3 (7): ISSN (online): 2321-0613.

[27] Odler, I. (1998). Hydration, setting and hardening of Portland cement. LEA’s Chemistry of Cement and Concrete, 4, 241-297.

[28] Pitroda Jayeshkumar, Zala L. B. and Umrigar F. S. 2013. “Innovative use of Paper Industry Waste (Hypo Sludge) in design mix concrete”. International Journal of Advanced Engineering Technology. 4(1): 31-35.

[29] Saurabh Chandarana, Jayesh Charthal, and Yogesh Chandarana. “Experimental study and evaluation of optimum mix proportion of “Papercrete blocks”. IJMTER 2015;02:157-161.

[30] Shukeri, R. B. and a Naser, A. G. "Concrete Mix with Wastepaper" 2nd international conference on built environment in developing countries (ICBEDC 2008), pp. 567-575.

[31] Singh L. R., Saleem A., and Geeta B. 2015. “Application of Paper Waste in Cement Concrete”. Journal of Engineering Research and Applications, 5(4): 95-98.

[34] Yogesh Shermale and Mahavir Balmukund Varma. (2017). Properties of Papercrete Concrete: Building Material. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 14 (2): 27-32.

[35] บริษัท เจอาร์ พรินติ้ง แอนด์ คอมพิวท์ จำกัด. กระบวนการผลิตกระดาษ [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 20 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://1th.me/apCIU

[36] ทรัพย์ทวีคูณวัสดุภัณฑ์. ทรายสำหรับใช้ก่อสร้างมีด้วยกันกี่ประเภท? [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 20 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://1th.me/oqlZb

[37] บริษัท ภูมิสยาม ซัพพลาย จำกัด. อิฐมวลเบา (LIGHTWEIGHT CONCRETE) [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 25 พ.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://1th.me/DbPeu

[38] ณปภัช โล่สุวรรณกุล และ สุธางศุ์หทัย เนตรรักษ์สกุล. (2561). ผลของกระดาษหนังสือพิมพ์ที่มีต่อสมบัติเปเปอร์ครีต. โครงการเสริมประสบการณ์การเรียนรู้ด้วยตัวเอง, ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใย

ตารางที่ ก.1 ค่าการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยกระดาษฉลากและพิมพ์เขียนใช้แล้วที่แช่ในของเหลวต่าง ๆ

ลักษณะ	เส้นใย	น้ำเปล่า	pH9	pH10	pH11
average fiber length (LN) [mm]	ฉลาก	0.549 ± 0.004	0.612 ± 0.009	0.609 ± 0.008	0.613 ± 0.002
	พิมพ์เขียน	0.612 ± 0.009	0.559 ± 0.002	0.561 ± 0.008	0.555 ± 0.002
length weighted average fiber length (LW) [mm]	ฉลาก	0.827 ± 0.029	0.812 ± 0.017	0.817 ± 0.012	0.818 ± 0.006
	พิมพ์เขียน	0.636 ± 0.008	0.650 ± 0.003	0.650 ± 0.012	0.638 ± 0.006
weight weighted average fiber length (LWW) [mm]	ฉลาก	1.275 ± 0.153	1.223 ± 0.056	1.242 ± 0.029	1.238 ± 0.015
	พิมพ์เขียน	0.730 ± 0.024	0.753 ± 0.020	0.746 ± 0.029	0.720 ± 0.015
Fine percent (<75 μm) [%]	ฉลาก	20.292 ± 0.728	20.449 ± 0.760	22.580 ± 0.724	21.490 ± 0.656
	พิมพ์เขียน	15.558 ± 1.188	15.777 ± 0.305	15.584 ± 0.724	15.093 ± 0.656
Mean curl	ฉลาก	0.118 ± 0.006	0.115 ± 0.003	0.120 ± 0.004	0.122 ± 0.001
	พิมพ์เขียน	0.098 ± 0.003	0.091 ± 0.002	0.093 ± 0.004	0.097 ± 0.001
Kink index	ฉลาก	1.690 ± 0.061	1.594 ± 0.026	1.653 ± 0.022	1.688 ± 0.035
	พิมพ์เขียน	1.386 ± 0.061	1.294 ± 0.026	1.289 ± 0.022	1.351 ± 0.035
Width [μm]	ฉลาก	22.350 ± 0.173	22.767 ± 0.252	22.700 ± 0.100	22.767 ± 0.173
	พิมพ์เขียน	22.033 ± 0.208	22.000 ± 0.000	22.300 ± 0.100	22.300 ± 0.173

ภาคผนวก ข

ค่าการซึมน้ำของกระดาษ

ตารางที่ ข.1 ค่าการทดสอบการซึมน้ำของเยื่อกระดาษฉลากและพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ

ชนิดกระดาษ		น้ำหนักก่อนทดสอบ (g.)	น้ำหนักหลังทดสอบ (g.)	การดูดซึมน้ำของกระดาษ (g/m^2)
ฉลาก	1	1.346	2.723	8.88
	2	1.335	2.828	9.63
เฉลี่ย				9.26
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	1	1.346	2.936	10.31
	2	1.335	3.180	11.63
เฉลี่ย				10.97

ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเยื่อกระดาษฉลากและพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ

กำหนด Load Cell 500 N ระยะห่างระหว่าง Clamp 10 cm

ชนิดกระดาษ		แรง (N)	ระยะยืด (mm)	Tensile strength (kN/m)	Percent stretch (%)	Tensile index (Nm/g.)	Breaking length (m)
ฉลาก	1	38.80	2.10	2.59	2.10	32.33	3298.00
	2	42.60	-	2.84	-	35.50	3621.00
	3	37.00	2.20	2.47	2.20	30.83	3145.00
	4	42.00	3.50	2.80	3.50	35.00	3570.00
เฉลี่ย		40.10±2.66	2.60±0.78	2.67±0.18	2.60±0.78	33.42±2.21	3408.50±225.74
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	1	41.80	1.70	2.79	1.70	34.83	3553.00
	2	45.40	2.60	3.03	2.60	37.83	3859.00
	3	39.80	2.10	2.65	2.10	33.17	3383.00
	4	46.40	2.20	3.09	2.20	38.67	3944.00
เฉลี่ย		43.35±3.08	2.15±0.37	2.89±0.21	2.15±0.37	36.13±2.57	3684.75±262.03

ภาคผนวก ง

ค่าความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)

ตารางที่ ง.1 ค่าความต้านทานแรงฉีกของเยื่อกระดาษฉลากและพิมพ์เขียนใช้แล้วเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ

ชนิดกระดาษ		Tear resistance (mN)	Tear index ($mN.m^2/g.$)
ฉลาก	1	1114.04	13.93
	2	996.36	12.45
เฉลี่ย		1055.20	13.19
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	1	796.30	9.95
	2	678.62	8.48
เฉลี่ย		737.46	9.22

ภาคผนวก จ

ค่าความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่เลือกมาจากงานวิจัย

ตารางที่ จ.1 ค่าความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์และทรายในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่เลือกมาจากงานวิจัยที่ผ่านมา

Cement : Sand	Super plasticizer (% by weight of cement)	Water/Cement ratio	Compressive Strength (MPa)
1 : 1.9	-	0.41	12.07
			7.98
			11.09
			11.55
			12.29
			11.26
เฉลี่ย			11.04±1.57
1 : 1	1.5	0.35	9.56
			16.63
			9.17
			11.94
			6.08
เฉลี่ย			10.68±3.93
0.75 : 1	0.5	0.35	10.7
			9.82
			12.97
			11.91
			12.08
			11.6
เฉลี่ย			11.51±1.11

ตารางที่ จ.2 ค่าความต้านทานกำลังอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่มีสารช่วยไหลตัวในปริมาณต่าง ๆ

Cement : Sand	Super plasticizer (% by weight of cement)	Water/Cement ratio	Compressive Strength (MPa)	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.75 : 1	0.35	0.5	10.7	11.51	1.11
			9.82		
			12.97		
			11.91		
			12.08		
			11.6		
		1	23.64	15.90	6.75
			20.82		
			21.27		
			7.92		
			10.35		
			11.37		
		1.5	11.82	15.10	1.92
			17.08		
			14.95		
			16.75		
			15.73		
			14.28		
		2	10.99	12.64	2.50
			13.81		
			10.03		
			14.96		
			10.33		
			15.73		

ภาคผนวก ฉ

ค่าความหนาแน่น

ตารางที่ ฉ.1 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตปกติ

ขนิดชิ้นงาน	จำนวนวันบ่ม	น้ำหนักหลังบ่ม (g.)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	Bulk density (g/cm^3)
คอนกรีตปกติ	1	279.170	49.970	50.800	50.300	2.186
		277.530	51.000	50.600	50.430	2.133
		290.390	50.500	50.770	51.970	2.179
		285.890	50.170	51.100	51.330	2.173
		279.800	50.900	50.400	49.770	2.191
เฉลี่ย		282.556±5.404	50.508±0.447	50.734±0.259	50.760±0.879	2.172±0.023
คอนกรีตปกติ	3	294.070	51.200	51.000	51.700	2.178
		288.670	50.900	51.100	51.100	2.172
		290.830	51.200	51.200	51.300	2.163
		N/A	51.600	51.630	52.570	N/A
		N/A	51.430	51.150	52.000	N/A
เฉลี่ย		291.190±2.718	51.100±0.265	51.100±0.243	51.367±0.583	2.171±0.008

ตารางที่ ฉ.2 ค่าความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลาก

เปเปอร์ครีต	ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	น้ำหนักหลังบ่ม (g.)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	Bulk density (g/cm^3)
ฉลาก	10	1	240.060	52.000	51.360	49.600	1.812
			248.300	51.330	53.000	51.430	1.775
			226.840	51.860	50.930	49.630	1.730
			227.850	50.670	51.230	49.800	1.763
			220.760	50.900	51.070	49.070	1.731
เฉลี่ย			232.762± 11.157	51.352± 0.580	51.518± 0.844	49.906± 0.895	1.762± 0.034
ฉลาก	20	1	204.600	50.670	50.800	48.700	1.632
			192.840	49.930	50.700	49.730	1.532
			203.880	50.200	50.500	49.970	1.609
			206.510	49.730	51.000	49.600	1.642
			207.780	51.400	50.800	49.070	1.622
เฉลี่ย			203.122± 5 951	50.386± 0.667	50.760± 0.182	49.414± 0.518	1.607± 0.044
ฉลาก	10	3	238.080	52.430	51.470	50.700	1.740
			228.060	51.500	50.570	49.770	1.759
			247.280	52.730	52.270	50.770	1.767
			236.310	52.470	51.700	49.630	1.755
			246.760	52.270	52.830	49.900	1.791
เฉลี่ย			239.298± 8.002	52.280± 0.466	51.768± 0.853	50.154± 0.539	1.763± 0.019

ตารางที่ ฉ.2 ค่าความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลาก (ต่อ)

ฉลาก	20	3	198.470	50.300	51.360	50.700	1.515
			209.880	51.470	51.670	49.330	1.600
			206.490	51.230	51.400	49.970	1.569
			205.780	51.300	51.470	49.430	1.577
			200.890	51.300	51.130	49.700	1.541
เฉลี่ย			204.302± 4.575	51.120± 0.476	51.406± 0.195	49.826± 0.548	1.560± 0.033
ฉลาก	10	7	250.160	52.200	52.430	51.270	1.783
			240.930	51.230	52.700	50.600	1.764
			246.950	51.170	51.370	50.970	1.843
			241.500	51.260	51.200	50.970	1.805
			245.410	51.300	51.930	50.530	1.823
เฉลี่ย			244.990± 3.854	51.432± 0.432	51.926± 0.650	50.868± 0.304	1.804± 0.032
ฉลาก	20	7	206.110	51.000	51.730	49.800	1.569
			201.430	50.060	51.770	49.400	1.573
			207.030	52.170	52.200	49.300	1.542
			220.660	52.000	52.370	50.930	1.591
			222.050	53.000	52.770	50.030	1.587
เฉลี่ย			211.456± 9.296	51.646± 1.136	52.168± 0.434	49.892± 0.651	1.572± 0.019
ฉลาก	30	7	212.730	52.200	52.400	50.630	1.536
			194.170	51.960	52.300	49.370	1.447
			187.940	50.430	51.730	50.400	1.429
			208.010	52.600	51.970	50.530	1.506
			205.020	51.700	52.270	51.100	1.485
เฉลี่ย			201.574± 10.228	51.778± 0.823	52.134± 0.277	50.406± 0.636	1.481± 0.043

ตารางที่ ฉ.2 ค่าความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลาก (ต่อ)

ฉลาก	10	14	223.470	50.300	50.300	50.870	1.736
			235.680	51.800	52.270	50.300	1.731
			224.680	50.430	50.630	50.530	1.741
			230.610	51.880	51.330	49.750	1.741
			229.220	51.500	50.750	50.180	1.748
เฉลี่ย			228.732± 4.903	51.182± 0.761	51.056± 0.774	50.326± 0.416	1.739± 0.006
ฉลาก	20	14	211.360	51.970	51.900	51.630	1.518
			208.740	51.200	51.170	51.230	1.555
			217.460	52.200	51.500	51.600	1.568
			201.010	49.570	51.500	49.530	1.590
			200.080	50.530	50.730	49.500	1.577
เฉลี่ย			207.730± 7.290	51.094± 1.077	51.360± 0.437	50.698± 1.091	1.561± 0.027
ฉลาก	30	14	209.280	52.200	52.100	50.830	1.514
			205.050	51.530	51.300	51.100	1.518
			212.680	52.600	52.970	51.300	1.488
			210.180	52.730	52.270	51.300	1.486
			211.210	52.500	52.360	50.570	1.519
เฉลี่ย			209.680± 2.880	52.312± 0.479	52.200± 0.601	51.020± 0.317	1.505± 0.016

ตารางที่ ฉ.3 ค่าความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว

เปเปอร์ครีต	ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	น้ำหนักหลังบ่ม (g.)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	Bulk density (g/cm^3)
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	10	1	235.320	52.330	51.000	50.430	1.748
			214.140	50.370	50.630	49.130	1.709
			216.200	50.400	50.500	49.200	1.727
			218.270	50.870	50.330	41.100	2.074
			236.510	52.200	51.700	50.100	1.749
เฉลี่ย			224.088± 10.903	51.234± 0.963	50.832± 0.544	47.992± 3.894	1.802±0. 153
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	20	1	216.020	51.930	52.200	50.900	1.566
			218.770	51.930	51.830	50.600	1.606
			219.500	51.500	51.770	50.930	1.616
			217.580	52.000	51.700	50.270	1.610
			220.390	52.670	51.170	50.600	1.616
เฉลี่ย			218.452± 1.705	52.006± 0.421	51.734± 0.370	50.660± 0.269	1.603± 0.021
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	10	3	203.940	49.870	50.330	205.240	1.603
			198.790	50.430	49.000	199.700	1.602
			218.830	51.600	50.670	219.820	1.627
			228.920	51.870	50.770	229.990	1.639
			214.630	52.030	50.600	215.760	1.599
เฉลี่ย			213.022± 11.980	51.160± 0.955	50.274± 0.731	214.102± 11.977	1.614± 0.018

ตารางที่ ฉ.3 ค่าความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว (ต่อ)

พิมพ์เขียนใช้แล้ว	20	3	213.070	51.430	52.730	50.230	1.564
			209.210	51.170	51.970	50.400	1.561
			205.440	51.130	51.200	50.000	1.570
			203.200	50.400	51.300	49.730	1.580
			213.340	52.430	51.760	49.730	1.581
เฉลี่ย			208.852± 4.518	51.312± 0.733	51.792± 0.613	50.018± 0.299	1.571± 0.009
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	10	7	230.250	51.500	52.270	50.900	1.680
			212.650	49.830	50.630	49.330	1.709
			214.150	50.630	50.670	49.330	1.692
			232.110	51.730	52.530	50.700	1.685
			224.230	50.530	51.670	50.400	1.704
เฉลี่ย			222.678± 8.972	50.844± 0.773	51.554± 0.882	50.132± 0.753	1.694± 0.012
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	20	7	187.460	50.200	51.300	49.200	1.480
			187.910	50.230	49.770	49.300	1.525
			190.920	50.760	50.970	49.500	1.491
			188.800	49.730	51.000	49.300	1.510
			190.110	50.930	50.900	49.330	1.487
เฉลี่ย			189.040± 1.459	50.370± 0.481	50.788± 0.589	49.326± 0.109	1.498± 0.019
พิมพ์เขียนใช้แล้ว	10	14	218.440	50.950	51.100	50.050	1.676
			218.890	50.500	50.630	49.870	1.717
			235.790	51.770	51.700	51.800	1.701
			232.180	51.330	51.730	51.680	1.692
			232.980	51.670	51.830	51.850	1.678
เฉลี่ย			227.656± 8.318	51.244± 0.526	51.398± 0.516	51.050± 0.999	1.693± 0.017

ตารางที่ ฉ.3 ค่าความหนาแน่นของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อกระดาษพิมพ์เขียนใช้แล้ว (ต่อ)

พิมพ์เขียนใช้แล้ว	20	14	206.190	51.070	50.900	50.360	1.575
			213.570	52.000	51.700	50.800	1.564
			209.520	51.600	51.800	50.570	1.550
			208.680	50.870	51.700	49.800	1.593
			207.110	51.300	51.130	49.600	1.592
เฉลี่ย			209.014± 2.860	51.368± 0.446	51.446± 0.404	50.226± 0.510	1.575± 0.018

ภาคผนวก ช

ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ ช.1 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของคอนกรีตที่บ่มเป็นเวลา 1 วัน

จำนวนวันบ่ม	คอนกรีตปกติ (%)	
1	1	-1.79
	2	1.52
	3	0.67
	4	2.74
	5	-1.06
เฉลี่ย	0.42	

ตารางที่ ช.2 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของคอนกรีตที่บ่มเป็นเวลา 3 วัน

Curing time (days)	คอนกรีตปกติ	
3	1	0.26
	2	-0.25
	3	-0.21
	4	N/A
	5	N/A
เฉลี่ย	-0.07	

ตารางที่ ช.3 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลากปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 1 วัน

Curing time (days)	**ฉลาก**					
	10%		**20%**		**30%**	
1	1	-3.84	1	-1.44	1	N/A
	2	-1.95	2	0.84	2	
	3	0.39	3	0.83	3	
	4	-0.87	4	-1.20	4	
	5	0.83	5	0.98	5	
เฉลี่ย	-1.09		0.00		-	

ตารางที่ ช.4 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลากปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 3 วัน

Curing time (days)	ฉลาก					
	10%		20%		30%	
3	1	-1.06	1	-0.47	1	N/A
	2	-3.90	2	-1.44	2	
	3	-3.16	3	-0.76	3	
	4	-3.22	4	0.01	4	
	5	-3.93	5	-0.13	5	
เฉลี่ย	-3.05		-0.56		-	

ตารางที่ ช.5 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลากปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 7 วัน

Curing time (days)	ฉลาก					
	10%		20%		30%	
7	1	5.00	1	0.43	1	-4.60
	2	2.94	2	0.47	2	-0.51
	3	-2.64	3	2.10	3	-1.80
	4	-0.14	4	-1.31	4	-3.32
	5	-0.59	5	-1.33	5	-1.54
เฉลี่ย	0.91		0.07		-2.35	

ตารางที่ ช.6 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อฉลากปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 14 วัน

Curing time (days)	ฉลาก					
	10%		20%		30%	
14	1	-1.05	1	1.93	1	-2.28
	2	-0.44	2	2.05	2	-1.64
	3	-0.71	3	0.38	3	1.48
	4	-2.08	4	-1.93	4	-1.79
	5	-1.39	5	-1.07	5	0.17
เฉลี่ย	-1.13		0.27		-0.81	

ตารางที่ ช.7 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อพิมพ์เขียนใช้แล้วปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 1 วัน

Curing time (days)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว			
	10%		20%	
1	1	0.37	1	1.71
	2	0.24	2	1.10
	3	0.21	3	-1.03
	4	-16.62	4	0.33
	5	0.56	5	0.81
เฉลี่ย	-3.05		0.58	

ตารางที่ ช.8 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อพิมพ์เขียนใช้แล้วปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 3 วัน

Curing time (days)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว			
	10%		20%	
3	1	0.18	1	0.57
	2	-1.62	2	2.60
	3	-0.58	3	1.74
	4	-0.24	4	1.20
	5	0.45	5	1.39
เฉลี่ย	-0.37		1.50	

ตารางที่ ช.9 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อพิมพ์เขียนใช้แล้วปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 7 วัน

Curing time (days)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว			
	10%		20%	
7	1	-0.76	1	2.48
	2	-1.01	2	1.01
	3	-0.28	3	2.30
	4	0.42	4	2.17
	5	0.19	5	1.07
เฉลี่ย	-0.29		1.81	

ตารางที่ ช.10 ค่าร้อยละปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของเปเปอร์ครีตที่มีเยื่อพิมพ์เขียนใช้แล้วปริมาณต่าง ๆ และบ่มเป็นเวลา 14 วัน

Curing time (days)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว			
	10%		20%	
14	1	-0.44	1	-2.82
	2	-0.29	2	-0.57
	3	-1.65	3	1.42
	4	-1.56	4	-2.25
	5	-0.25	5	-3.05
เฉลี่ย	-0.84		-1.45	

ภาคผนวก ซ

ค่าความต้านทานกำลังอัด

ตารางที่ ซ.1 ค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	คอนกรีตปกติ (MPa)	ค่าเฉลี่ย
0	1	1	14.88	10.98±3.06
		2	6.53	
		3	9.9	
		4	11.84	
		5	11.74	
	3	1	10.7	11.50±1.24
		2	9.82	
		3	12.97	
		4	11.91	
		5	12.08	

ตารางที่ ซ.2 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 10%โดยน้ำหนักและบ่ม 1 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
10	1	1	2.13	2.50
		2	2.21	2.41
		3	1.92	2.44
		4	2.31	2.41
		5	2.40	2.64
ค่าเฉลี่ย			2.19±0.18	2.48±0.10

ตารางที่ ซ.3 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 20%โดยน้ำหนักและบ่ม 1 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
20	1	1	1.6	1.82
		2	1.06	1.47
		3	1.9	1.94
		4	1.75	2.11
		5	1.02	2.08
ค่าเฉลี่ย			1.47±0.40	1.884±0.26

ตารางที่ ซ.4 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 10%โดยน้ำหนักและบ่ม 3 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
10	3	1	2.35	1.79
		2	2.21	1.79
		3	2.55	1.83
		4	2.28	1.89
		5	2.58	1.76
ค่าเฉลี่ย			2.39±0.16	1.812±0.05

ตารางที่ ซ.5 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 20%โดยน้ำหนักและบ่ม 3 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
20	3	1	1.61	1.46
		2	1.56	1.51
		3	1.55	1.51
		4	1.72	1.47
		5	1.76	1.5
ค่าเฉลี่ย			1.64±0.10	1.49±0.02

ตารางที่ ซ.6 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 10%โดยน้ำหนักและบ่ม 7 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
10	7	1	2.87	3.36
		2	2.58	3.3
		3	2.61	3.27
		4	2.49	3.36
		5	2.61	3.25
ค่าเฉลี่ย			2.63±0.14	3.31±0.05

ตารางที่ ซ.7 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 20%โดยน้ำหนักและบ่ม 7 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
20	7	1	1.65	1.24
		2	1.61	1.35
		3	1.69	1.3
		4	1.72	1.36
		5	1.81	1.38
ค่าเฉลี่ย			1.70±0.08	1.33±0.06

ตารางที่ ซ.8 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 30%โดยน้ำหนักและบ่ม 7 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
30	7	1	2.22	N/A
		2	2.59	
		3	1.39	
		4	2.11	
		5	2.11	
ค่าเฉลี่ย			2.08±0.44	

ตารางที่ ซ.9 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 10%โดยน้ำหนักและบ่ม 14 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
10	14	1	3.41	2.96
		2	3.69	3.13
		3	3.32	3.09
		4	3.61	2.6
		5	3.7	2.98
ค่าเฉลี่ย			3.55±0.17	2.95±0.21

ตารางที่ ซ.10 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 20%โดยน้ำหนักและบ่ม 14 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
20	14	1	2.05	1.87
		2	2.03	1.81
		3	1.98	1.85
		4	2.09	1.79
		5	2.02	1.66
ค่าเฉลี่ย			2.03±0.04	1.80±0.08

ตารางที่ ซ.11 ค่าความต้านทานกำลังอัดของเปเปอร์ครีตทีมีเยื่อกระดาษ 30%โดยน้ำหนักและบ่ม 14 วัน กำหนดอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 0.75 : 1 W/C ratio = 0.35 และมี SP 0.5%

ปริมาณเยื่อ (%โดยน้ำหนัก)	จำนวนวันบ่ม	ก้อนที่	ฉลาก (MPa)	พิมพ์เขียนใช้แล้ว (MPa)
30	14	1	1.99	N/A
		2	2.71	
		3	2.25	
		4	1.83	
		5	2.16	
ค่าเฉลี่ย			2.19±0.33	