

ผลการใช้พิทเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียดต่อสมบัติของวัสดุเปเปอร์กรีต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF PITCHER UTILIZATION AS MILLED SAND REPLACEMENT ON PROPERTIES
OF PAPERCRETE MATERIAL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลการใช้ฟิสิกเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียดต่อสมบัติของวัสดุ เปเปอร์กรีต
โดย	น.ส.นภัสสร แสงศิริผล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ธีรภาพิเศษพงษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

นักัสสร แสงศิริผล : ผลการใช้พิทเชอร์แทนที่ทรายบดละเอียดต่อสมบัติของวัสดุเปเปอร์กรีต. (EFFECTS OF PITCHER UTILIZATION AS MILLED SAND REPLACEMENT ON PROPERTIES OF PAPERCRETE MATERIAL) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.วันทนี พุกกะคุปต์

วัสดุเปเปอร์กรีตเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกใหม่ประกอบไปด้วยกระดาษรีไซเคิลผสมกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีสมบัติมีความเป็นฉนวนกันเสียงและความร้อนที่ดี รวมทั้งมีน้ำหนักเบากว่าเดิมเมื่อเทียบกับคอนกรีตแบบดั้งเดิม ในขณะที่ปัจจุบันเศษเซรามิกที่ผ่านกระบวนการเคลือบและเผามาแล้วหรือที่รู้จักกันในชื่อของเซรามิกพิทเชอร์เป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมเซรามิก และยังรวมไปถึงอุตสาหกรรมเครื่องปั้นที่สร้างเศษกระดาษฉลากเหลือทิ้งจากขวดแก้วบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการล้างทำความสะอาดสำหรับการนำบรรจุภัณฑ์กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งก่อให้เกิดขยะเศษกระดาษในปริมาณมากของแต่ละปี ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเศษกระดาษฉลากเหลือทิ้งผสมใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน และพิทเชอร์ที่ได้รับจากงานสโตนแวร์ที่แตกหักถูกนำไปบดละเอียดแล้วมาใช้แทนที่ทรายบดละเอียดในการผลิตวัสดุเปเปอร์กรีตเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีตรงต่อสิ่งแวดล้อม อัตราส่วนวัตถุดิบปูนซีเมนต์ต่อทรายบดละเอียดต่อกระดาษต่อน้ำ คือ 1 : 1 : 0.3 : 2 และเซรามิกพิทเชอร์แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75, และ 100 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาเปรียบเทียบตัวอย่างที่บ่มในบรรยากาศชื้นเป็นเวลา 7 วัน และตัวอย่างที่บ่มออโตเคลฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มในบรรยากาศชื้นและมีการแทนที่พิทเชอร์ในปริมาณร้อยละ 75 ให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงที่สุดที่ 8.63 MPa ความหนาแน่นที่ 1.56 g/cm³ และมีค่าดูดซึมน้ำร้อยละ 20.53 นอกจากนี้พบว่าการใช้เส้นใย PVA ร่วมกับการใช้กระดาษฉลากส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้กระดาษฉลากเพียงอย่างเดียว โดยจากภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการแทนที่ด้วยพิทเชอร์ทั้งหมดมีการฟอร์มตัวของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและพอร์ตแลนด์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้เซรามิกพิทเชอร์เป็นวัสดุพอโซลาน

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370071023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: papercrete; beverage bottles label paper waste; ceramic pitcher;

Napatsorn Sawaengsiriphol : EFFECTS OF PITCHER UTILIZATION AS MILLED SAND REPLACEMENT ON PROPERTIES OF PAPERCRETE MATERIAL. Advisor: Asst. Prof. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. WANTANEE BUGGAKUPTA, Ph.D.

Papercrete is a new alternative building material that consists of recycled paper with Portland cement. Papercrete has good sound and thermal insulation, as well as being lighter than conventional concrete. Ceramic scrap that has been glazed and fired, also known as pitcher, is a waste generated by the ceramic industry. Furthermore, the beverage industry generates label paper waste from washed and reused beverage glass bottles in a large quantity each year. In this work, label paper waste was used as a partial replacement of cement. Pitcher obtained from broken stoneware was milled for used as milled sand substitution in the production of papercrete to develop eco-friendly building materials. The weight ratio of cement : milled sand : paper : water was 1 : 1 : 0.3 : 2. The pitcher was replaced with 0–100 wt% of milled sand. Samples were investigated in 2 conditions: cured in a moist atmosphere for 7 days and cured in an autoclave at 160°C for 2 hours. The results showed that samples cured in a moist atmosphere with 75% pitcher replacement showed the highest flexural strength of 8.63 MPa, a density of 1.56g/cm³, and water absorption of 20.53%. In particular, using PVA fibres together with label paper resulted in an increase in the flexural strength. The microstructure of the sample with 100% pitcher generated calcium silicate hydrate and portlandite demonstrated the efficiency of using ceramic pitcher as a pozzolan material.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่านและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับการให้คำแนะนำ คำปรึกษาและการอบรมสั่งสอนที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และอาจารย์ทุกท่านสำหรับการตรวจสอบแก้ไข รวมถึงคำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเงินทุนการดำเนินงานวิจัยจากโครงการ Water Resilient City Unit (WRCU) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นระยะเวลา 2 ปี

ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนการศึกษาจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นระยะเวลา 2 ปี

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านสำหรับการช่วยเหลือ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ปริญญาโท รหัส 63 ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นภัสสร แสงศิริผล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เปเปอร์กรีต.....	3
2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3
2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	5
2.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	6
2.2.3 ปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น	8
2.2.4 การพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาค.....	8
2.2.4.1 ผลกระทบที่ไฮเดรชันของแคลเซียมอะลูมิเนต.....	8
2.2.4.2 เอททริงไคต์และโมนอซัลเฟต	9
2.2.5 การบ่มคอนกรีต.....	9

2.3	วัสดุกระตุ้นแอลคาไลน์.....	11
2.4	ฉลากบรรจุภัณฑ์.....	14
2.5	วัสดุปอซโซลาน.....	17
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....		30
3.1	วัตถุประสงค์ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงาน	30
3.2	การศึกษาลักษณะของวัสดุติบ	31
3.2.1	การกระจายตัวขนาดอนุภาค	31
3.2.2	องค์ประกอบทางเคมี.....	31
3.2.3	องค์ประกอบทางเฟส.....	31
3.2.4	โครงสร้างทางจุลภาค.....	31
3.3	วิธีการดำเนินงาน	31
3.3.1	การทดลองใช้กระดาษฉลากและพีทเซอร์	31
3.3.2	การทดลองใช้กระดาษพิมพ์เขียนและพีทเซอร์.....	33
3.3.3	การทดลองการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพีทเซอร์	34
3.4	การตรวจสอบลักษณะสมบัติของชิ้นงาน	35
3.4.1	ความต้านแรงดัด (Flexural strength).....	35
3.4.2	ความเหนียว (Toughness).....	35
3.4.3	ความหนาแน่นรวม (Bulk density)	36
3.4.4	การดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	36
3.4.5	องค์ประกอบเฟส (Phase composition).....	36
3.4.5	โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure).....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....		37
4.1	ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุติบ	37

4.1.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution)	37
4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition).....	38
4.1.3 องค์ประกอบทางเฟส (Phase composition).....	39
4.1.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	39
4.2 ความต้านแรงดัด (Flexural strength).....	42
4.2.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต.....	42
4.2.2 การศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนและพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต.....	44
4.2.3 การศึกษาการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพิตเซอร์ในวัสดุ เป เปอร์กรีต.....	45
4.3 ความเหนียว (Toughness).....	47
4.3.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต.....	47
4.3.2 การศึกษาการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพิตเซอร์ในวัสดุ เป เปอร์กรีต.....	48
4.4 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) และการดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	49
4.4.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต.....	49
4.4.2 การศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนและพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต.....	52
4.4.3 การศึกษาการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพิตเซอร์ในวัสดุ เป เปอร์กรีต.....	54
4.5 องค์ประกอบเฟส (Phase compositions).....	56
4.6 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	58
4.6.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต.....	58
4.6.2 การศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนและพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต.....	62
4.6.3 การศึกษาการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพิตเซอร์ในวัสดุ เป เปอร์กรีต.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	65

5.1 สรุปผลการทดลอง	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	76



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ผลวิเคราะห์ของเส้นใยกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์	17
ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบทางกายภาพของกระดาษฉลาก	17
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของสารโปซโซลานแต่ละประเภท.....	19
ตารางที่ 2.4 ความแข็งแรงของชิ้นงานเปเปอร์กรีตจากงานวิจัย Cardinale และคณะ	20
ตารางที่ 2.5 สัดส่วนผสมชิ้นงานเปเปอร์กรีตจากงานวิจัย Ashori และคณะ	21
ตารางที่ 2.6 สัดส่วนผสมชิ้นงานมอร์ตาร์จากงานวิจัย Awoyera และคณะ	27
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดวัตถุดิบ.....	30
ตารางที่ 3.2 สูตรการทดลองเตรียมชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมกระดาษฉลากและพิทเซอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	32
ตารางที่ 3.3 สูตรการทดลองที่มีกระดาษพิมพ์เขียนและพิทเซอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก).....	33
ตารางที่ 3.4 สูตรการทดลองที่มีกระดาษฉลาก เส้นใย PVA และพิทเซอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก).....	34
ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวขนาดอนุภาค.....	37
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	39

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	4
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	7
รูปที่ 2.3 แผนผังการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง	11
รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยากระตุ้นแอลคาไลน์ในวัสดุที่มีแคลเซียมสูง	12
รูปที่ 2.5 (ก) การเกิดปฏิกิริยากระตุ้นแอลคาไลน์ในวัสดุที่มีแคลเซียมต่ำ (ข) โครงสร้าง 2 มิติของ N-A-S-H [27] และ (ค) โครงสร้าง 3 มิติของ N-A-S-H	14
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	16
รูปที่ 2.7 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีปริมาณกระดาษและระยะเวลาบ่มที่แตกต่างกัน	20
รูปที่ 2.8 ความต้านทานแรงดัดชิ้นงานเปเปอร์กรีตจากงานวิจัย Ashori และคณะ	21
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการรับแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการเติมเยื่อกระดาษในปริมาณ ร้อยละ (ก) 0-8 (ข) 8-14 จากงานวิจัยของ Khorami และ Ganjian	22
รูปที่ 2.10 เส้นใยเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนจากงานวิจัย Khorami และ Ganjian	22
รูปที่ 2.11 โครงสร้างจุลภาคของกระดาษฉลากและกระดาษพิมพ์เขียนที่กำลังขยาย 150 เท่า จากงานวิจัยวิภาวีและอารียา	24
รูปที่ 2.12 ความต้านแรงอัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีต จากงานวิจัยวิภาวีและอารียา.....	24
รูปที่ 2.13 ความต้านแรงอัดของชิ้นงานมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย อิฐมอญ (RCB) กระเบื้องเซรามิก (TCW) และสุขภัณฑ์เซรามิกเหลือทิ้ง (CSW) จากงานวิจัยของ Pitarch และคณะ	25
รูปที่ 2.14 SAI ของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยอิฐมอญ (RCB) กระเบื้องเซรามิก(TCW) และสุขภัณฑ์เซรามิกเหลือทิ้ง (CSW) จากงานวิจัยของ Pitarch และคณะ	25
รูปที่ 2.15 SAI ชิ้นงานมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยสุขภัณฑ์เซรามิก	26
รูปที่ 2.16 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานมอร์ตาร์จากงานวิจัยของ Awoyera และคณะ	28
รูปที่ 2.17 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่ผ่านการบ่ม 7 วัน จากงานวิจัยณัฐภัทร์ และพศวัต	29

รูปที่ 3.1 กระจกฉลากลากเหลือทิ้ง	32
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบความต้านแรงดัดแบบ 3 - Point bending	35
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคควัตถุติดกับการกระจายตัวแบบสะสม	37
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคควัตถุติดกับการกระจายตัวแบบปริมาณ	38
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของ (ก) พิตเซอร์ และ (ข) ทรายบดละเอียด	39
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์	40
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของทรายบดละเอียด	40
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของพิตเซอร์	41
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของกระจกฉลากลากเหลือทิ้ง	41
รูปที่ 4.8 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระจกฉลากลากและพิตเซอร์	44
รูปที่ 4.9 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่พิตเซอร์ร้อยละ 75 และมีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน	44
รูปที่ 4.10 ความต้านแรงดัดระหว่างชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีผสมกระจกฉลากลากและชิ้นงานที่ผสมกระจกพิมพ์เขียนภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟ	45
รูปที่ 4.11 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระจกฉลากลาก เส้นใย PVA และมีการพิตเซอร์ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก บ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน	46
รูปที่ 4.12 หน้าตัดของชิ้นงาน (ก) ชิ้นงานสูตรควบคุม (ข) ชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระจกฉลากลาก	47
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระจกฉลากลาก และพิตเซอร์ผ่านกระบวนการบ่มขึ้น 7 วัน	48
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระจกฉลากลาก เส้นใย PVA และพิตเซอร์ร้อยละ 75 ผ่านกระบวนการบ่มขึ้น 7 วัน	49
รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระจกฉลากลากและพิตเซอร์	50
รูปที่ 4.16 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีการเติมกระจกฉลากลากและพิตเซอร์	51
รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่พิตเซอร์ร้อยละ 75 และมีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน	52

รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่พิตเซอร์ร้อยละ 75 และมีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน.....	52
รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษพิมพ์เขียวและพิตเซอร์เปรียบเทียบกับการใช้กระดาษฉลาก ภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟ.....	53
รูปที่ 4.20 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษพิมพ์เขียวและพิตเซอร์เปรียบเทียบกับการใช้กระดาษฉลาก ภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟ	54
รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษฉลาก เส้นใย PVA และพิตเซอร์	55
รูปที่ 4.22 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษฉลาก เส้นใย PVA และพิตเซอร์	55
รูปที่ 4.23 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและพิตเซอร์	57
รูปที่ 4.24 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและพิตเซอร์	57
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและไม่มีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์ (0P) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มขึ้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ.....	59
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์ร้อยละ 25 (25P) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มขึ้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ	60
รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์ร้อยละ 50 (50P) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มขึ้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ	60
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์ร้อยละ 75 (75P) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มขึ้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ	61
รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์ทั้งหมด (100P) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มขึ้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ.....	61
รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่พิตเซอร์ร้อยละ 75 ผ่านการนำไปแช่น้ำก่อนบ่มอโตเคลฟ	62
รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียว และไม่มีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์ผ่านการบ่มด้วยอโตเคลฟ.....	63

- รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียน และมีการ
แทนที่ด้วยพิทเซอร์ทั้งหมดผ่านการบ่มด้วยอโตเคลฟ 63
- รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากร่วม กับเส้นใย
PVA ร้อยละ 5 และมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 75 ผ่านการบ่มขึ้น 64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเซรามิกปัจจุบันในประเทศไทยมีการขยายตัวมากขึ้นเพื่อรองรับความต้องการภายในประเทศรวมถึงการส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศ ทำให้มีการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกในปริมาณมากขึ้นและในทางเดียวกันเมื่อการผลิตมากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณพิทเซอร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ได้ผ่านกระบวนการเผาแล้วเกิดตำหนิรอยร้าว การแตกหัก รวมถึงข้อบกพร่องในเรื่องขนาดผลิตภัณฑ์หลังเผาไม่ตรงตามมาตรฐานจนทำให้ไม่สามารถนำไปวางขายได้ เซรามิกพิทเซอร์เหล่านี้ถูกจัดเป็นของเสียทางอุตสาหกรรมซึ่งแนวทางในการกำจัดเซรามิกพิทเซอร์จะถูกนำไปยังหลุมฝังกลบ มีเพียงปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกนำกลับมารีไซเคิลและเนื่องจากพิทเซอร์เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีทำให้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องนำพิทเซอร์กลับมารีไซเคิลเพื่อประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจในการประหยัดต้นทุนวัตถุดิบและด้านสิ่งแวดล้อมในการช่วยลดของเสียจากผลิตภัณฑ์เซรามิก และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบหลักของเซรามิกพิทเซอร์ได้แก่ ซิลิกา ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับทราย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจที่จะนำพิทเซอร์กลับมารีไซเคิลเพื่อลดปริมาณการใช้ทรายเป็นตะกั่วในกระบวนการผลิตเปเปอร์กรีต

เปเปอร์กรีตเป็นวัสดุเชิงประกอบทางเลือกใหม่ที่มีความคล้ายคลึงกับคอนกรีต มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างบ้านสำหรับส่วนที่ไม่ได้รับแรงเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น ฝ้า ผนัง วัสดุบุหลังคา หรือ อิฐบล็อก เป็นต้น เปเปอร์กรีตมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนและฉนวนกันเสียงที่ดี มีน้ำหนักเบาและสามารถขึ้นรูปทรงได้หลากหลาย รวมถึงต้นทุนวัตถุดิบมีราคาถูกและเป็นวัสดุที่มีความยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเปเปอร์กรีตช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และเพิ่มการใช้ประโยชน์จากเศษกระดาษเหลือทิ้ง โดยวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และกระดาษรีไซเคิล โดยกระดาษรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือเศษกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องดื่มจากกระบวนการนำขวดบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดแก้วมารีไซเคิลทำให้มีเศษกระดาษฉลากเหลือทิ้งในปริมาณมาก

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ รวมถึงผลกระทบการใช้พิทเซอร์แทนที่ทรายเป็นตะกั่วขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุเปเปอร์กรีตที่ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclave) เปรียบเทียบความแข็งแรงกับวัสดุเปเปอร์กรีตที่ผ่านกระบวนการบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ในการเสริมแรงและการใช้พิตเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียดในวัสดุเปเปอร์กรีตที่ส่งผลต่อสมบัติองค์ประกอบเฟส โครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงเชิงกายภาพของวัสดุเปเปอร์กรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบเฟส การกระจายตัวอนุภาคและโครงสร้างทางจุลภาคของพิตเซอร์
- 2) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของกระดาษฉลากเหลือทิ้ง
- 3) ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่ใช้พิตเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 0, 25, 50, 75, และ 100 โดยน้ำหนักของทรายบดละเอียด ขึ้นรูปด้วยการอัดแรงดันทิศทางเดียวที่ความดัน 25 MPa ด้วยแม่พิมพ์โลหะขนาด 10.1x5 เซนติเมตร
- 4) ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากเหลือทิ้ง และเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
- 5) เปรียบเทียบสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่ผ่านการบ่มขึ้น 7 วัน และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยหม้ออัดแรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 6) ทดสอบสมบัติเชิงกายภาพได้แก่ ความต้านทานแรงดัด ความหนาแน่นรวม ความเหนียว และการดูดซึมน้ำ
- 7) ศึกษาองค์ประกอบเฟสและโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ผลิตภัณฑ์วัสดุเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์และมีการใช้พิตเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เปเปอร์กรีต

เปเปอร์กรีตเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากคอนกรีต โดยขึ้นรูปจากการผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และกระดาษรีไซเคิล ปัจจุบันเปเปอร์กรีตได้รับความสนใจมากขึ้นในฐานะวัสดุที่มีความยั่งยืนและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และเพิ่มการใช้ประโยชน์จากเศษกระดาษเหลือทิ้ง [1] นอกจากนี้วัตถุดิบต้นทุนในการผลิตมีราคาถูก สามารถขึ้นรูปทรงได้หลายหลาย รวมถึงมีความเป็นฉนวนกันความร้อนและฉนวนกันเสียงที่ดี [2] และมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตแบบดั้งเดิม แต่ถึงอย่างไรก็ตามเปเปอร์กรีตยังคงมีข้อเสียอยู่จากการผสมกระดาษลงไปทำให้วัสดุเปเปอร์กรีตดูดซึมน้ำหรือความชื้นได้มากและมีความทนทานที่ต่ำเนื่องจากกระดาษที่ผสมอาจเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อเวลาผ่านไป [3] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้ทำการศึกษาการใช้กระดาษเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ผสมกับปูนซีเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น กระดาษพิมพ์เขียน [4-7] กระดาษหนังสือพิมพ์ [1, 8] กระดาษนิตยสาร [9] และกระดาษลัง [10, 11] เป็นต้น ซึ่งการผสมกระดาษลงไปจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก่วัสดุโดยเฉพาะความต้านแรงดึง (Tensile strength) และความต้านแรงดัด (Flexural strength) [4] โดยเส้นใยที่กระจายตัวในเมทริกซ์จะช่วยควบคุมการโตของรอยแตก (Crack) [3] รวมถึงเมื่อพิจารณาความแข็งแรงของวัสดุเปเปอร์กรีตแล้วพบว่าสามารถใช้ทดแทนไม้ได้บางชนิด [12] ในบางกรณีวัสดุเปเปอร์กรีตมีการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับสมบัติบางอย่าง เช่น การเติมสารกันซึมเพื่อช่วยให้เปเปอร์กรีตมีความต้านทานการซึมน้ำ หรือการใช้คอนกรีตซิลิเลอร์หรือการเคลือบด้วยกรดบอริกและบอแรกซ์เพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟ [2] วัสดุเปเปอร์กรีตนิยมนำไปใช้ในการก่อสร้างอาคารหรือบ้านสำหรับส่วนที่ไม่ได้รับแรงเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น ผนัง แผ่นฝ้า บอร์ด วัสดุบุหลังคา รวมทั้งสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตกแต่งหรือเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ ได้

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

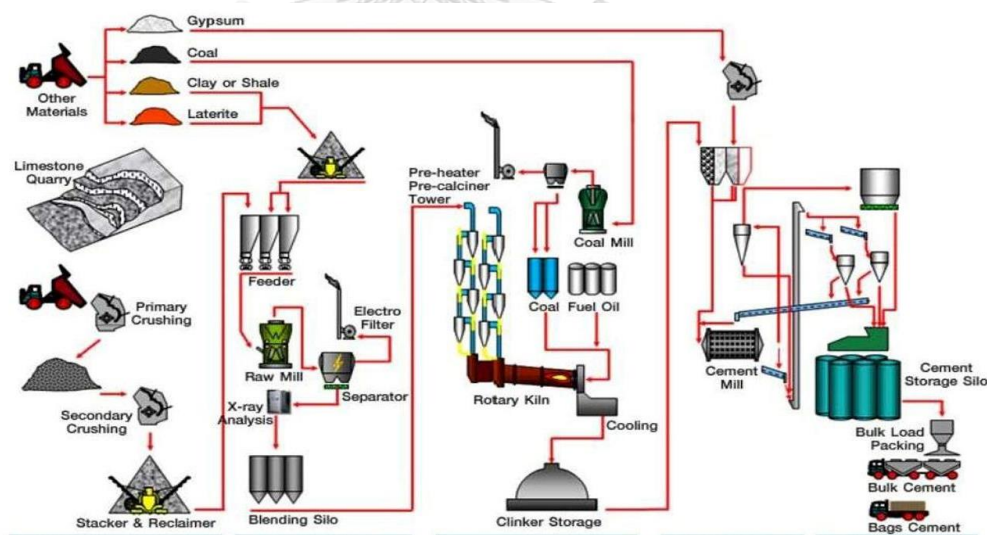
ปูนซีเมนต์ มาจากภาษาละตินที่มีความหมายว่าวัสดุเชื่อมประสานซึ่งจะประสานของแข็งขนาดเล็กเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาเป็นพื้นฐานสำคัญในคอนกรีต (Concrete) มอร์ตาร์ (Mortar) และซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) [13] กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 วิธีตามลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ วิธีผลิตแบบเปียก (Wet process) และวิธีผลิตแบบ

แห้ง (Dry process) ซึ่งปัจจุบันนิยมการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้งเนื่องจากเป็นวิธีที่ทันสมัยและใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตน้อยกว่า

วิธีการในการผลิตปูนเม็ด (Clinker) ประกอบไปด้วยวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ [14, 15] ดังนี้

- 1) Calcareous materials ได้แก่ หินปูน หรือดินสอพอง
- 2) Argillaceous materials ได้แก่ ดินดำ ดินเหนียว หรือดินดาน
- 3) Iron oxide materials ได้แก่ แร่เหล็ก หรือศิลาแลง

โดยวัตถุดิบจะถูกนำมาบดเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ จากนั้นวัตถุดิบจะถูกแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยา Decarbonization โดยหินปูนจะเกิดการสลายตัวและปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา จากนั้นวัตถุดิบจะถูกลำเลียงเข้าเตาเผาแบบหมุน (Rotary Klin) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผา 1400-1500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสารประกอบที่สำคัญได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_3S) ไدแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A) และแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF) ซึ่งจะหลอมตัวกันเป็นเม็ดปูน จากนั้นเม็ดปูนจะถูกลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจนเหลือ 100 องศาเซลเซียส และจะถูกนำมาบดผสมกับยิปซัม ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ร้อยละ 3-5 เพื่อห่วงปฏิกิริยาของปูน รวมถึงเติมสารเติมแต่งเพื่อให้เหมาะสมกับปูนชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [15]

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามลักษณะการนำไปใช้งาน ดังนี้

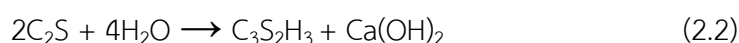
- 1) ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement type) เหมาะสำหรับการใช้งานก่อสร้างทั่วไป เช่น สะพาน ถนน หรือท่อระบายน้ำ เป็นต้น
- 2) ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland cement) เหมาะสำหรับการใช้งานในการก่อสร้างขนาดใหญ่ซึ่งมีความคงทนต่อซัลเฟตได้ปานกลางปัจจุบันปูนซีเมนต์ประเภทนี้ยังไม่มีการผลิตในประเทศไทย
- 3) ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High early strength Portland cement) เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานคอนกรีตที่ต้องการความรวดเร็ว ซึ่งไม่เหมาะสำหรับงานที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ เนื่องจากเกิดการคายความร้อนในช่วงต้นอย่างรวดเร็วที่อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านโครงสร้างได้
- 4) ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low heat Portland cement) เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อน เนื่องจากปูนประเภทนี้ช่วยลดปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้างที่เกิดจากความร้อนได้
- 5) ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulfate resistance Portland Cement) เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่มีสภาวะความเป็นซัลเฟตสูง เช่น น้ำทะเล

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

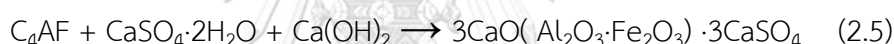
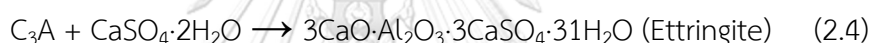
ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำก่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถช่วยยึดวัสดุต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน โดยในการเกิดปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นทั้ง 2 แบบ [14] ได้แก่

- 1) การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยการละลาย ในช่วงแรกของปฏิกิริยาโดยซีเมนต์ที่ละลายในน้ำทำให้มีไอออนในสารละลาย โดยไอออนนี้จะเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบใหม่
- 2) การเกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ปฏิกิริยานี้เกิดหลังจากการอาศัยการละลาย โดยจะเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคของแข็ง

สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยควบคุมและพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีต ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H) ดังสมการ

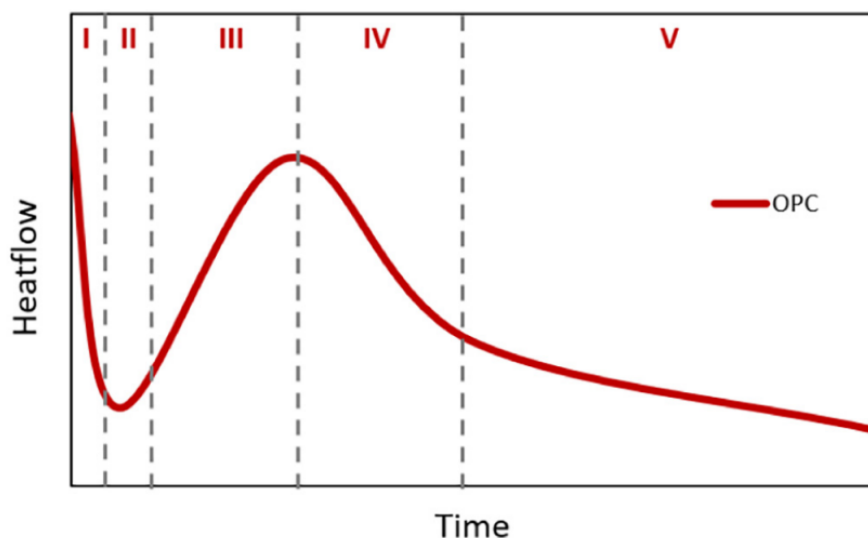


แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานโดยจะควบคุมความแข็งแรงของคอนกรีต เกิดขึ้นในลักษณะอสัณฐานหรือที่รู้จักกันในชื่อเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) [16] ซึ่งไม่มีความเป็นระเบียบและมีรูพรุน นอกจากนี้สารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ที่อยู่ในซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำและยิปซัม โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตเกิดการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงต้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงได้มีการเติมยิปซัมลงในซีเมนต์เพื่อหน่วงปฏิกิริยา ซึ่งก่อให้เกิดผลึกเข็มเอททริงไคต์เกิดขึ้นที่ผิวของ C_3A ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ในส่วนของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF จะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยทำปฏิกิริยากับยิปซัมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดสารประกอบซัลโฟอะลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลเฟอไรต์ (Sulphoferrite) ซึ่งทั้งสองสารประกอบนี้ไม่ได้มีส่วนในการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีต แต่จะช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี ดังสมการที่ 2.5 [14, 16]



2.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถตรวจสอบได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (XRD) แต่ยังมีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องการศึกษาปฏิกิริยาในระดับนาโนหรือระดับชั่วโมง จึงได้มีการพัฒนาการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเทคนิคที่มีแหล่งกำเนิดเป็นแสงซินโครตรอน (Wide Angle X-ray Scattering) [17] และเนื่องจากไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นองค์ประกอบในซีเมนต์ที่สำคัญซึ่งมีปริมาณมากถึงร้อยละ 55 โดยจะช่วยควบคุมการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีตผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงได้มีการอธิบายการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน [18, 19] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [18]

ขั้นที่ I (The induction period): เป็นช่วงเริ่มต้นที่แคลเซียมซิลิเกตได้รับน้ำ โดยแคลเซียมออกไซด์ และซิลิเกตไอออนที่อยู่ในพื้นผิวของ C_3S ถูกปล่อยลงในสารละลาย ดังสมการที่ 2.6 ในขั้นนี้ปฏิกิริยานี้มีการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว



ขั้นที่ II (The dormant period): เป็นช่วงสงบนิ่ง โดยในช่วงนี้ปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้าๆ เนื่องจากเกิดการก่อตัวของไฮเดรตในขั้นแรกจะเคลือบบนผิวของ C_3S เพื่อชะลอการละลาย

ขั้นที่ III (The acceleration period): เป็นเข้าสู่การเริ่มต้นแข็งตัว (Initial setting) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลายชั่วโมงหลังจากการผสม ไฮเดรตที่ก่อตัวเคลือบ C_3S เกิดการแตกตัวออกทำให้น้ำในสารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ได้มากขึ้นและดำเนินปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง ในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (C-S-H) เกิดการโตมากขึ้น

ขั้นที่ IV (The deceleration period): ในช่วงนี้จะมีลักษณะคล้ายช่วงที่สาม โดยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันจะเกิดการโตขึ้นอย่างต่อเนื่องและจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์

ขั้นที่ V (Last hydration period): ในช่วงนี้ปฏิกิริยายังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องแบบช้าๆ โครงสร้างทางจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสดี

2.2.3 ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation reaction) ในคอนกรีต คือปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่ได้จากผลิตภัณฑ์ไฮดรชัน ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 [20] โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นบริเวณที่ผิวหน้าคอนกรีตสัมผัสอากาศและบริเวณที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านรูพรุนเข้ามาในโครงสร้าง ทั้งนี้ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเกิดในสภาพการละลายดังนั้นจึงต้องการความชื้นที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา ข้อดีของการเกิดปฏิกิริยานี้คือผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนตที่ได้จากปฏิกิริยาจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการซึมผ่านที่ต่ำลง ภายในโครงสร้างมีความหนาแน่น และการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันทำให้ความเป็นต่างจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดต่ำลง แต่ถึงอย่างไรก็ตามหากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กการเกิดปฏิกิริยานี้ส่งผลทำให้เหล็กเกิดสนิมได้



2.2.4 การพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาค

2.2.4.1 ผลิตภัณฑ์ไฮดรชันของแคลเซียมอะลูมิเนต

การทำปฏิกิริยาไฮดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮดรชัน ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮดรชันที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างซึ่งมีค่า pH ประมาณ 12.5 ทำให้ช่วยด้านทานการกัดกร่อนของโลหะได้เป็นอย่างดี [14] สำหรับชิ้นงานคอนกรีตที่บ่มในอุณหภูมิห้องแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม [18, 21] ได้แก่

- 1) เจลแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (Semi crystalline C-S-H gel) หรือ Low density C-S-H ซึ่งจะพบเจอได้ส่วนใหญ่ในคอนกรีต มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ในช่วง 21.7 - 25.74 GPa และมีค่าความแข็ง (Hardness) ประมาณ 0.80 - 0.93 GPa

2) ผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Crystalline C-S-H phase) หรือ High density C-S-H ซึ่งจะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) 22.97 - 41.45 GPa และมีค่าความแข็ง (Hardness) 0.80 - 1.43 GPa

โดยองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตขึ้นอยู่กับปัจจัยของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ อายุของซีเมนต์เพสต์, องค์ประกอบของซีเมนต์, อุณหภูมิในการบ่ม, และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ [14] และสำหรับคอนกรีตที่บ่มด้วยสภาวะภายใต้ไฮโดรเทอร์มัล (Autoclave) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีแนวโน้มจะเปลี่ยนผลึกไปอยู่ในรูปของผลึกโทเบอร์โมไรต์ (Tobermorite) หรือผลึกโซโนไลต์ (Xonolite) ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้นและช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้แก่คอนกรีต [21]

2.2.4.2 เอททริงไคต์และโมนอสัลเฟต

เอททริงไคต์ที่เกิดขึ้นล้อมรอบบริเวณผิวไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (สมการ 2.4) มีลักษณะรูปร่างเป็นผลึกเข็มช่วยให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตในช่วงแรก โดยเมื่อเกิดผลึกเอททริงไคต์จะมีแรงดันปริมาตรของแข็ง ซึ่งในที่สุดจะทำให้ชั้นผลึกเอททริงไคต์เกิดการแตกออกจากไตรแคลเซียมซิลิเกตทำให้มีผลึกเอททริงไคต์ใหม่เกิดขึ้นแทน ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนปริมาณซัลเฟตไอออนไม่เพียงพอที่จะเกิดเอททริงไคต์ใหม่ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะทำการเปลี่ยนเอททริงไคต์ไปเป็นโมนอสัลเฟต (Monosulphate) [14]

2.2.5 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีต คือ กระบวนการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของคอนกรีตเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ โดยเป็นกระบวนการป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียน้ำจากคอนกรีตเร็วเกินไปและยังช่วยควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่คอนกรีต ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต และเพิ่มความทนทาน นอกจากนี้กระบวนการบ่มคอนกรีตอย่างต่อเนื่องช่วยลดขนาดรูพรุนและป้องกันการหดตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต [22] โดยความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่มเนื่องจากความชื้นที่เพียงพอจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง แต่ในทางปฏิบัติการบ่มคอนกรีตมีระยะเวลาที่จำกัดสาเหตุจากเรื่องค่าใช้จ่าย กำหนดการ

ก่อสร้าง หรือเชิงพาณิชย์ ทำให้มีมาตรฐานแนะนำการบ่มขึ้นสำหรับคอนกรีตทั่วไปอย่างน้อย 7 วัน เนื่องจากในช่วงแรกกำลังอัดของคอนกรีตจะมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะเริ่มพัฒนาช้าลงหลังจากการบ่ม 28 วัน [23] โดยแบ่งวิธีการบ่มคอนกรีตออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

- 1) การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติ เป็นวิธีการบ่มเพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ผิวหน้าคอนกรีตโดยตรง และเป็นวิธีการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำไม่ให้เกิดการระเหยออกจากคอนกรีต ซึ่งการบ่มที่อุณหภูมิปกติสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การชังน้ำ การคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น รวมทั้งการใช้สารเคมีเคลือบที่ผิวคอนกรีตหรือการใช้แผ่นพลาสติกคลุม เป็นต้น
- 2) การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง เป็นวิธีการบ่มด้วยความร้อนและมีความชื้นสูง ซึ่งเป็นวิธีการบ่มที่นิยมในอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป โดยจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้กำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาอย่างรวดเร็ว จึงสามารถประหยัดเวลาและได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงในระยะเวลาน้อย [24] การบ่มในวิธีนี้สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.1 การบ่มไอน้ำที่ความดันต่ำ (Low pressure steam curing) เป็นวิธีการบ่มคอนกรีตที่ใช้อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมิที่ 65-80 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิการบ่มที่ให้ผลความแข็งแรงดีที่สุด

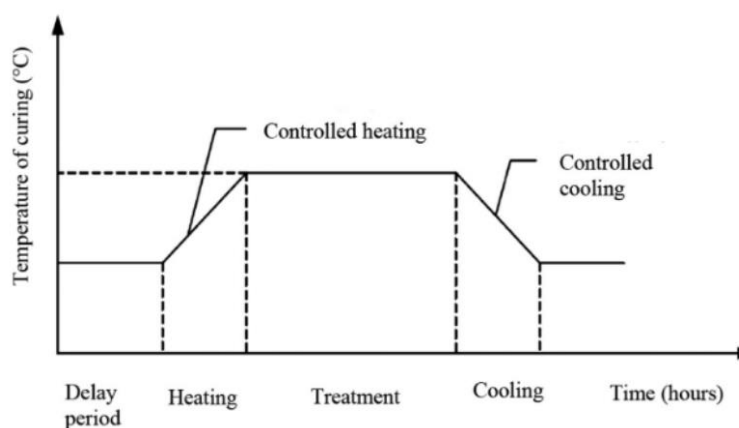
2.2 การบ่มไอน้ำที่ความดันสูง (High pressure steam curing, Autoclave) เป็นวิธีการบ่มที่ใช้อุณหภูมิในช่วง 160-210 องศาเซลเซียส โดยทำการบ่มในบรรยากาศปิดและมีการให้ความดันสูง ซึ่งนิยมเรียกวิธีการบ่มแบบนี้ว่าบ่มออโตคลอว์ โดยกลไกการบ่มคอนกรีตแบ่งออกเป็น 4 ช่วง [16, 22] แสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้

ช่วงที่ 1: ช่วงก่อนเวลาบ่ม (Delay period): เป็นช่วงเวลาตั้งแต่คอนกรีตขึ้นรูปเสร็จและปล่อยให้เกิดการเซตตัวก่อนนำไปบ่ม มีงานวิจัยได้ทำการยืนยันว่าการปล่อยระยะเวลาคอนกรีตเซตตัวที่ 2-6 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่มส่งผลดีในด้านความแข็งแรง ความทนทาน และการซึมผ่านของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่มีการทิ้งระยะเวลาเซตตัวจะมีความแข็งแรงของเพิ่มขึ้นร้อยละ 15-40 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ทำการบ่มทันทีหลังจากขึ้นรูปเสร็จ นอกจากนี้การชะลอเวลาบ่มช่วยลดการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยิปซัมและแคลเซียมอะลูมิเนต

ช่วงที่ 2: ช่วงเพิ่มความร้อน (Heating): เป็นช่วงเวลาการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงเป้าหมาย ควรใช้อัตราการเร่งความร้อนไม่เกิน 20 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เนื่องจากการเร่งอัตราความร้อนที่เร็วเกินไปจะส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสียหายได้ โดยการให้อัตราความร้อนที่ช้าจะช่วยให้เกิดการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

ช่วงที่ 3: ช่วงรักษาอุณหภูมิตั้งที่ (Treatment): ในช่วงนี้ความร้อนของไอน้ำที่ใช้สำหรับการบ่มจะเกิดการถ่ายโอนไปยังคอนกรีต โดยปัจจัยในการถ่ายโอนความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิ ระยะเวลาการบ่ม และความหนาของคอนกรีต โดยความร้อนจะเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เกิดการก่อตัวของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ช่วงที่ 4: ช่วงลดอุณหภูมิ (Cooling): เป็นช่วงแสดงถึงการเสร็จสิ้นกระบวนการบ่มคอนกรีต ซึ่งการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจะก่อให้เกิดการแตกร้าวบนผิวคอนกรีต เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในคอนกรีตและอุณหภูมิภายนอก จึงมีการแนะนำให้ใช้อัตราการลดอุณหภูมิเทียบเท่ากับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ



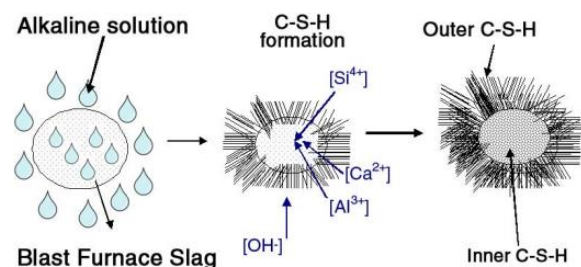
รูปที่ 2.3 แผนผังการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง [22]

2.3 วัสดุกระตุ้นแอลคาไลน์

วัสดุกระตุ้นแอลคาไลน์ (Alkaline-activated materials) คือวัสดุที่ใช้เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์เนื่องจากปูนซีเมนต์มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาปริมาณมากระหว่างกระบวนการผลิตซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก โดยวัสดุกระตุ้นด้วยแอลคาไลน์

ได้รับจากปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นเป็นวัสดุทดแทนในซีเมนต์ (Supplementary materials) ส่วนใหญ่ อยู่ในรูปของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีลักษณะอสัณฐาน เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือตะกรันจากเตาหลอม (Blast furnace slag) ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายแอลคาไลน์ ซึ่งแบ่ง ออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา [25, 26] ดังนี้

- 1) วัสดุกระตุ้นด้วยแอลคาไลน์ที่มีปริมาณแคลเซียมสูง $[(Na,K)_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O]$ ยกตัวอย่างเช่น การใช้ตะกรันจากเตาหลอมเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีปริมาณซิลิกาและแคลเซียม ออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 ในกรณีนี้ได้ผลิตภัณฑ์หลักจากการกระตุ้นแอลคาไลน์คือ เจลแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium aluminosilicate hydrate, C-A-S-H gel) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพียงแต่ C-A-S-H มีอัตราส่วนระหว่าง CaO/SiO_2 ในช่วง 0.9-1.2 ในขณะที่ C-S-H มี อัตราส่วนระหว่าง CaO/SiO_2 ในช่วง 1.5-2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแอลคาไลน์ไอออนทำหน้าที่เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันผ่านการแลกเปลี่ยนประจุ Ca^{2+} ทำให้ไอออนแอลคาไลน์ถูกนำเข้าไป ในโครงสร้าง



รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยากระตุ้นแอลคาไลน์ในวัสดุที่มีแคลเซียมสูง [26]

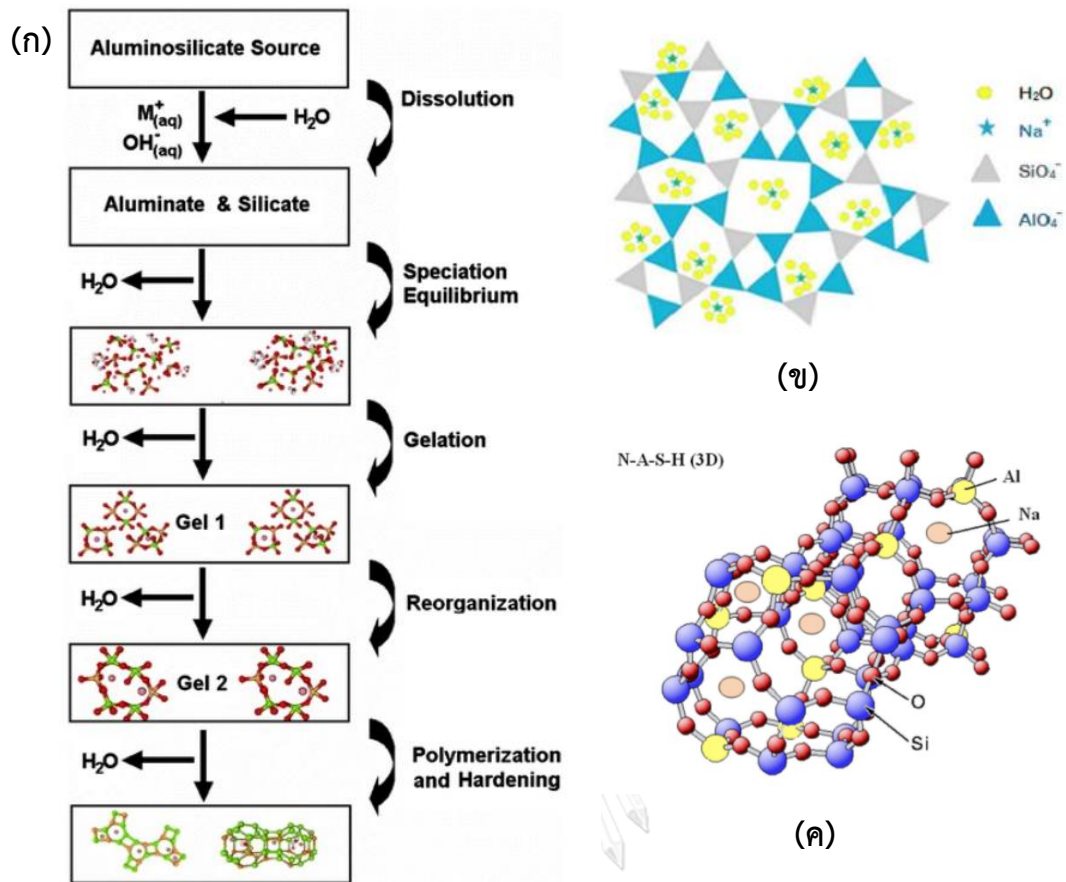
- 2) วัสดุกระตุ้นด้วยแอลคาไลน์ที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ $[(Na,K)_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O]$ เช่น การใช้เถ้าลอยหรือดินขาว (Metakaolin) เป็นสารตั้งต้นซึ่งประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมและซิลิกอนเป็นหลัก ในกรณีนี้สารละลายมีความเป็นด่างสูง และใช้อุณหภูมิในการบ่มในช่วง 60-200 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแอลคาไลน์คือ เจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Sodium aluminosilicate hydrate, N-A-S-H gel) ซึ่งมีระดับพอลิเมอไรเซชันที่แตกต่างกันขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง SiO_2/Na_2O โดย N-A-S-H มีสมบัติเป็นเฟสเชื่อมประสานสามารถรับแรงได้เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และ N-A-S-H ในโครงสร้างอสัณฐานจะมีการพัฒนาโครงสร้างเป็นฟลิกซีโอไลต์หรือ

ไฮเดรตอะลูมิโนซิลิเกต (Zeolite, Hydrate-aluminosilicate) ที่มีลักษณะเป็นโครงข่าย ประกอบไปด้วยช่องว่างและรูพรุนขนาดเล็ก โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยากระตุ้นแอลคาไลน์ แสดงในรูปที่ 2.5 ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน [27] ดังนี้

ขั้นที่ 1 การละลาย: วัสดุอะลูมิโนซิลิเกตจะทำการปล่อยโมโนเมอร์ของซิลิเกต $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ และอะลูมินेट $[\text{Al}(\text{OH})_4]$ โดยสารละลายแอลคาไลน์จะเข้าไปทำลายพันธะที่ยึดอะลูมิโนซิลิเกตเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้สารละลายมีเป็นความเป็นด่างสูง (pH สูงกว่า 14) และเกิดเป็นเฟสคอลลอยด์

ขั้นที่ 2 การควบแน่น: ช่วงเริ่มต้นของเฟสคอลลอยด์ น้ำจะถูกกำจัดออกไป เนื่องจากมีปฏิกิริยาการแทนที่ของนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic) โดยโมโนเมอร์ของซิลิเกต และอะลูมินेटที่แสดงประจุ -1 จะเชื่อมต่อกับส่วนอื่นเนื่องจากการดึงดูดหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิเกตด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ของอะลูมินेट ในขั้นตอนนี้เริ่มมีการก่อตัวของอะลูมิโนซิลิเกตแบบไม่เสถียรขึ้น

ขั้นที่ 3 การตกผลึก: กระบวนการดำเนินต่อไปโดยมีการกำจัดน้ำมากขึ้น ในขั้นตอนนี้เจลเริ่มก่อตัวมากขึ้น และเนื่องจากอะลูมินेटและซิลิเกตมีประจุลบดังนั้นการมีไอออนบวกของโลหะแอลคาไลน์ เช่น Na^+ หรือ K^+ ทำให้เกิดความสมดุลของประจุในสารละลาย ทำให้เจลที่ก่อตัวขึ้นเกิดจากจัดระเบียบโครงสร้างใหม่ เกิดสารประกอบ N-A-S-H ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน ซึ่งหากมีการพัฒนาอยู่ในรูปของผลึกหรือกึ่งผลึกจะทำการเรียกว่าซีโอไลต์



รูปที่ 2.5 (ก) การเกิดปฏิกิริยากระตุ้นแอลคาไลน์ในวัสดุที่มีแคลเซียมต่ำ (ข) โครงสร้าง 2 มิติของ N-A-S-H [27] และ (ค) โครงสร้าง 3 มิติของ N-A-S-H [25]

โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยากระตุ้นแอลคาไลน์มีสมบัติเป็นเฟสเชื่อมประสาน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะโดยมีความทนทานที่ดี และมีความต้านทานสูง ป้องกันการเกิดการหดตัวและมีการนำความร้อนต่ำ รวมถึงการใช้วัตถุดิบจากผลพลอยได้ เช่น ถ่านลอย หรือตะกรันเตาหลอม ทำให้ช่วยลดต้นทุนและมีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ แต่ถึงอย่างไรก็ตามการใช้วัสดุกระตุ้นแอลคาไลน์ทำให้เมทริกซ์มีค่าความเป็นด่างสูงมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อร่างกาย

2.4 ฉลากบรรจุภัณฑ์

ฉลากบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท [28, 29] ดังนี้

- 1) ฉลากกระดาษ: ฉลากที่ผลิตจากกระดาษฉลากจะแบ่งย่อยเป็นฉลากกระดาษธรรมดาและฉลากกระดาษกาว ซึ่งสำหรับเครื่องตีแม่เหล็กฮอลล์และน้ำอัดลมจะนิยมใช้ฉลากกระดาษ

ธรรมดาโดยใช้กาวอะคริลิกหรือกาวน้ำเพื่อติดกับบรรจุภัณฑ์ แต่การใช้กระดาษฉลากติดบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้มีข้อเสีย เนื่องจากกระดาษเกิดการฉีกขาดได้ง่ายและไม่เหมาะสมสำหรับการแช่บรรจุภัณฑ์ในน้ำแข็งหรือในสถานที่ที่มีความชื้นสูงอาจส่งผลทำให้กระดาษฉลากเกิดการหลุดลอกเสียหายได้

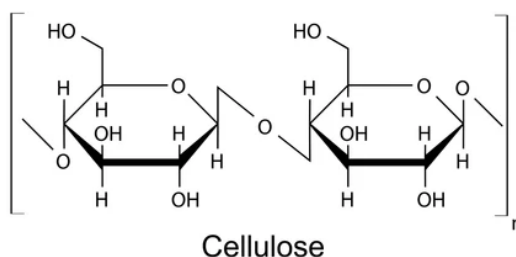
- 2) **ฟิล์มใส:** การใช้วัสดุฟิล์มใสเนื่องจากมีความยืดหยุ่นและทนทานมากกว่ากระดาษฉลากเหมาะสำหรับการติดบนบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ต้องการมองเห็นฉลากอย่างชัดเจน แต่ถึงอย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้ฟิล์มใสทำให้ถูกจำกัดในด้านการออกแบบในกรณีที่ขวดบรรจุภัณฑ์มีสีเข้ม
- 3) **ฟิล์มขาว:** วัสดุฟิล์มขาวมีความทนทานและมีประสิทธิภาพเทียบเท่าฟิล์มใส เหมาะสำหรับการใช้งานติดฉลากบนบรรจุภัณฑ์ทั้งประเภทขวดและกระป๋อง
- 4) **กระดาษเอสเสตท (Estate paper):** กระดาษพรีเมียมที่นิยมใช้ติดฉลากบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมไวน์ กระดาษมีเนื้อเรียบมัน ราคาค่อนข้างสูง จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมในบรรจุภัณฑ์ทั่วไป
- 5) **ฟิล์มเคลือบโลหะ:** วัสดุฉลากฟิล์มเคลือบโลหะ มีความสามารถกันน้ำได้ดีเยี่ยม สามารถใช้กับบรรจุภัณฑ์ได้ทั้งประเภทขวดและกระป๋อง

กระดาษฉลากเหลือทิ้งในงานวิจัยนี้ได้รับมาจากกระบวนการนำขวดบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดแก้วมาล้างทำความสะอาดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูง ส่งผลให้ฉลากที่ติดแนบกับขวดบรรจุภัณฑ์หลุดออกมาส่งผลทำให้มีเศษกระดาษฉลากเหลือทิ้งในปริมาณกว่า 1000 ตันต่อปี [30] ทางอุตสาหกรรมกระดาษได้มีการนำเศษกระดาษไปรีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นกระดาษคราฟท์หรือกระดาษลูกฟูกบ้างแล้วแต่ยังคงมีปัญหาในด้านการเจือปนอยู่ โดยเศษกระดาษสามารถนำมารีไซเคิลได้เพียงไม่กี่ครั้ง เนื่องจากการรีไซเคิลแต่ละครั้งส่งผลทำให้ความยาวของเส้นใยเซลลูโลสลดลงซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงและคุณภาพที่ต่ำลง จึงทำให้ไม่เหมาะสำหรับการนำเศษกระดาษรีไซเคิลไปผลิตกระดาษ [4]

โครงสร้างของกระดาษประกอบไปด้วย 2 ส่วน [4, 31] ดังนี้

- 1) **เส้นใย:** ส่วนที่เป็นเส้นใยเป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ โดยเส้นใยในกระดาษส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น ต้นสน ต้นยูคาลิปตัส ซึ่งจะทำการผสมกันระหว่างเส้นใยสั้นประมาณร้อยละ 60 และเส้นใยยาวประมาณร้อยละ 10 เพื่อให้กระดาษมีผิวเรียบ มีความเหนียวและมีความทึบแสง โดยในโครงสร้างของเส้นใยประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose)

ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสถูกจับมาเรียงต่อกันด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ดังรูปที่ 2.6 และนอกจากนี้เส้นใยยังมีส่วนประกอบของลิกนิน (Lignin) แต่จะถูกกำจัดออกไปในระหว่างกระบวนการผลิตเนื่องจากลิกนินจะทำให้กระดาษมีสีเหลือง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [32]

- 2) สารเติมแต่ง: สารเติมแต่งนิยมใช้เป็นสารตัวเติมและสารเคลือบผิวในอุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อให้กระดาษมีความขาว ผิวเรียบ ลดรูปพูนในการดาษเพื่อให้มีความทึบแสงและเพิ่มสมบัติดูดซับหมึกพิมพ์ได้ดี โดยสารเติมแต่งที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดินขาว (Kaolin) ทัลก์ (Talc) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยการใช้สารเติมแต่งไม่เพียงแต่เพิ่มสมบัติที่ดีให้กระดาษแล้วยังช่วยเพิ่มน้ำหนักกระดาษโดยที่ใช้เส้นใยลดน้อยลงซึ่งเป็นการลดต้นทุนของกระดาษ

การศึกษาลักษณะของเยื่อกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ โดยการนำ เส้นใยกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ ที่ผ่านการแช่ในสารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกันเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fiber quality analyzer แสดงในตาราง 2.1 และผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์แสดงในตารางที่ 2.2 [33]

ตารางที่ 2.1 ผลวิเคราะห์ของเส้นใยกระดาษฉลากบรรจุภัณฑ์ [33]

ลักษณะ	น้ำเปล่า	pH 9	pH 10	pH 11
Average fiber length (mm)	0.549 ± 0.004	0.612 ± 0.009	0.609 ± 0.008	0.613 ± 0.002
Length weighted average fiber length (mm)	0.827 ± 0.029	0.812 ± 0.017	0.817 ± 0.012	0.818 ± 0.006
Weight Weighted average fiber length (mm)	1.275 ± 0.153	1.223 ± 0.056	1.242 ± 0.029	1.238 ± 0.015
Fine percent (<75micron) (%)	20.292 ± 0.728	20.449 ± 0.760	22.580 ± 0.724	21.490 ± 0.656
Mean curl	0.118 ± 0.006	0.115 ± 0.003	0.120 ± 0.004	0.122 ± 0.001
Kink index	1.690 ± 0.061	1.594 ± 0.026	1.653 ± 0.022	1.688 ± 0.035
Width (µm)	22.350 ± 0.173	22.767 ± 0.252	22.700 ± 0.100	22.767 ± 0.173

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบทางกายภาพของกระดาษฉลาก [33]

สมบัติ	กระดาษฉลาก
Tensile strength (kN/m)	2.733 ± 0.269
Percent stretch (%)	2.600 ± 0.781
Tensile index (Nm/g)	34.167 ± 3.364
Breaking length (m)	3485 ± 343.103
Water absorptiveness (g/m ²)	9.26 ± 0.530

2.5 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ได้แก่ ซิลิกา หรือมีทั้งซิลิกาและอะลูมินา นิยมใช้เพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์หรือใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง ความทนทาน จากการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติหรือที่

เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบที่มีสมบัติเป็นเฟสเชื่อมประสานในคอนกรีต โดยวัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด [34, 35] ได้แก่

- 1) วัสดุปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ (Natural pozzolan) เช่น เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย และหินภูเขาไฟ เป็นต้น
- 2) วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้
 - 2.1) ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต (By product) เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือกากตะกอนเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น
 - 2.2) ดินขาวเผา (Treated clay) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Metakaolin ซึ่งยังรวมไปถึงของเสียดินเหนียวที่ได้ผ่านกระบวนการความร้อนมาแล้ว ยกตัวอย่างเช่น อิฐ หินอ่อน และของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเซรามิก

ของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกไม่ว่าจะเป็นกระเบื้อง หลังคา อิฐ สุขภัณฑ์ รวมถึงงานชามเซรามิกซึ่งเป็นของเสียอันเกิดจากการแตกหักของผลิตภัณฑ์หลังเผา และเกิดจากการมีข้อบกพร่องในเรื่องของขนาดผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ทำให้ถูกจัดเป็นของเสียเหลือทิ้งในปริมาณมากซึ่งมักจะนำไปฝังกลบ มีเพียงปริมาณเล็กน้อยที่ถูกนำมารีไซเคิลใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกใหม่ ซึ่งได้มีแนวทางการนำเศษเซรามิกมารีไซเคิลในคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การนำเศษเซรามิกมาบดหยาบเพื่อใช้แทนที่กรวดหยาบธรรมชาติสำหรับส่วนผสมในคอนกรีต และการนำเศษเซรามิกมาบดละเอียดเพื่อใช้เป็นสารเติมเต็ม (Supplementary filler) หรือใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีต ปัจจุบันการศึกษาค่าการใช้เศษเซรามิกเป็นวัสดุปอซโซลานได้รับความสนใจค่อนข้างน้อย เนื่องจากเศษเซรามิกมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ค่อนข้างต่ำและเกิดปฏิกิริยาช้า รวมถึงมีประสิทธิภาพในการเป็นสารเติมเต็มผสมในซีเมนต์น้อยเมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน [35]

มาตรฐาน ASTM-C618 สำหรับวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ [36] ได้จำแนกประเภทวัสดุปอซโซลานออกเป็น 3 ประเภท ซึ่งต้องมียอดประกอบทางเคมีดังที่แสดงในตาราง 2.3 ได้แก่

ประเภท N คือวัสดุปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ เช่น หินดินดาน ซีเถ้าภูเขาไฟ โดยจะนำไปเผาเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ

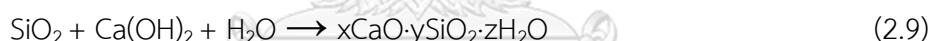
ประเภท F คือวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการเผาวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น การเผาหินบิวมินัส หรือหินแอนทราไซด์

ประเภท C คือวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการเผาวัตถุดิบธรรมชาติคล้ายกับประเภท F เพียงแต่มีปริมาณซิลิกา อะลูมินาและไอรอนออกไซด์ ต่างจากประเภท F

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของสารปอซโซลานแต่ละประเภท [36]

	ประเภท		
	N	F	C
ปริมาณซิลิกา(SiO ₂), อะลูมินา(Al ₂ O ₃) และไอรอนออกไซด์(Fe ₂ O ₃) รวมกัน ต้องไม่น้อยกว่า	70%	70%	50%
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) ต้องไม่เกิน	4%	5%	5%
ปริมาณความชื้นต้องไม่เกิน	3%	3%	3%
การสูญเสียจากการเผา (Loss of ignition) ต้องไม่เกิน	10%	6%	6%

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดภายหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือพอร์ตแลนด์ไคต์ (Ca(OH)₂, CH) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดยจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาในวัสดุปอซโซลาน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium aluminat hydrate, C-A-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium aluminosilicate hydrate, C-A-S-H) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.11

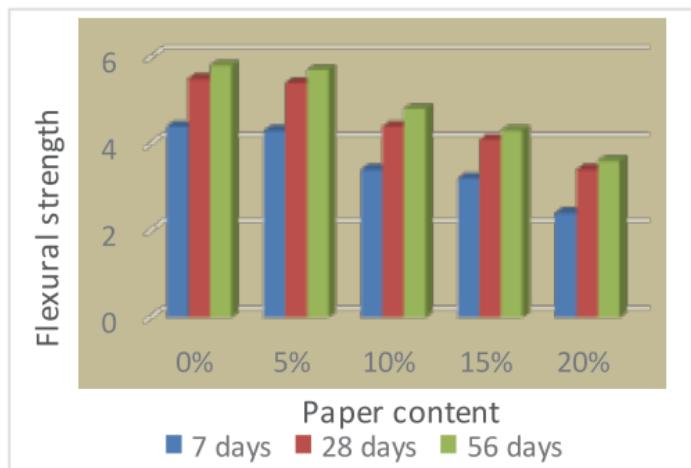


ตัวแปร w, x, y และ z ในสมการแปรเปลี่ยนไปตามชนิดสารประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทั้งนี้ปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องขึ้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลาน เช่น องค์ประกอบทางเคมี หรือความละเอียด เป็นต้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gorgis และคณะ [4] ศึกษาสมบัติของเปเปอร์กรีตโดยใช้กระดาษพิมพ์เขียนเป็นส่วนผสมในสัดส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใช้สัดส่วนผสมซีเมนต์ต่อทรายต่อกรวดหยาบ ได้แก่ 1:1.9:2.5 ทำการเปรียบเทียบชิ้นงานที่บ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 7, 28 และ 56 วัน พบว่าชิ้นงานเปเปอร์ที่เติมกระดาษในสัดส่วนร้อยละ 5 ให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดที่ 5.7 เมกะพาสคัลที่

อายุการบ่ม 56 วัน แสดงในรูป 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนของกระดาษส่งผลให้ ความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดต่ำลง และระยะเวลาการบ่มชิ้นงานมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ



รูปที่ 2.7 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีปริมาณกระดาษและระยะเวลาบ่มที่ แตกต่างกัน [4]

Cardinale และคณะ [5] ศึกษาลักษณะสมบัติเชิงกลและกายภาพของวัสดุเปเปอร์กรีตโดยใช้กระดาษพิมพ์เขียนในลักษณะที่แตกต่างกันคือกระดาษที่ผ่านการตัดเป็นชิ้นเล็กและเยื่อกระดาษใน สัดส่วนร้อยละ 2, 5, และ 10 โดยปริมาตร และใช้สัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำ ได้แก่ 1:3:0.5 จากนั้นทำการบ่มชิ้นงานทิ้งไว้ 28 วัน แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงในตารางที่ 2.4 พบว่าชิ้นงาน เปเปอร์กรีตที่ทำการผสมเยื่อกระดาษมีแนวโน้มให้ความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่ผสมกระดาษชิ้นเล็ก โดยชิ้นงานที่ผสมเยื่อกระดาษในสัดส่วนร้อยละ 5 ให้ค่าความต้านแรงดัดสูงสุดที่ 5.32 เมกะพาสคัล ตารางที่ 2.4 ความแข็งแรงของชิ้นงานเปเปอร์กรีตจากงานวิจัย Cardinale และคณะ [5]

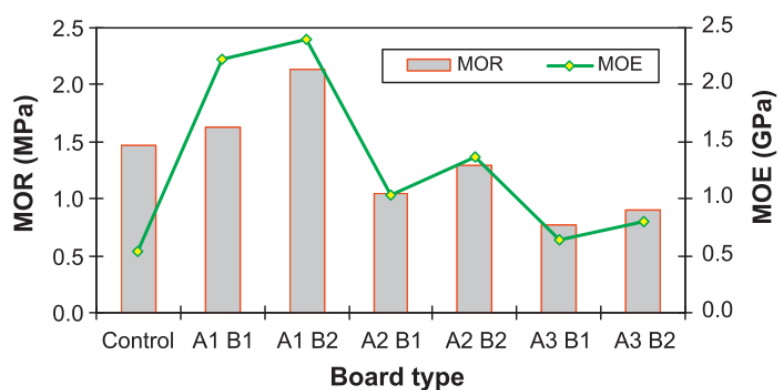
	ความต้านทานแรงดัด (MPa)	ความต้านทานกำลังอัด (MPa)
REF	5.42	22.56
PAPER2	4.67	13.56
PAPER5	4.38	11.74
PAPER10	3.17	6.92
PULP2	4.87	14.11
PULP5	5.32	11.27
PULP10	3.48	10.21

หมายเหตุ Paper = กระดาษที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก

Pulp = เยื่อกระดาษ

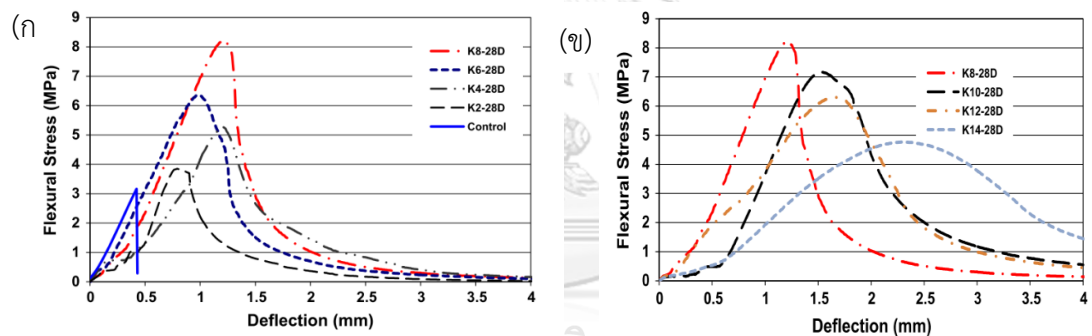
Ashori และคณะ [8] ศึกษาการเตรียมบอร์ดกรีตจากหนังสือพิมพ์รีไซเคิล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เพื่อเป็นสารเร่งการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์ โดยใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อหนังสือพิมพ์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10:90, 15:85, และ 20:80 แสดงตารางที่ 2.5 ทำขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการกดอัดที่ 2 เมกะพาสคัล และทำการบ่มขึ้นชิ้นงานเป็นระยะเวลา 28 วัน แสดงผลการทดสอบความต้านแรงดัดในรูปที่ 2.8 พบว่าการเติมกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุด ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนกระดาษส่งผลให้มีความต้านแรงดัดต่ำกว่าชิ้นงานควบคุม และการใช้แคลเซียมคลอไรด์ช่วยปรับปรุงสมบัติของเปเปอร์กรีต ตารางที่ 2.5 สัดส่วนผสมชิ้นงานเปเปอร์กรีตจากงานวิจัย Ashori และคณะ [8]

	Fiber (%)	Cement (%)	CaCl_2 (%)
Control	0	100	0
A1B1	10	90	3
A1B2	10	90	5
A2B1	15	85	3
A2B2	15	85	5
A3B1	20	80	3
A3B2	20	80	5



รูปที่ 2.8 ความต้านทานแรงดัดชิ้นงานเปเปอร์กรีตจากงานวิจัย Ashori และคณะ [8]

Khorami และ Ganjian [11] ศึกษาผลกระทบของการใช้กระดาษล่องเหลือทิ้งเสริมแรงในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตในสัดส่วนร้อยละ 1-14 และทำการบ่มชิ้นงานเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมเยื่อกระดาษร้อยละ 8 ที่อายุการบ่ม 28 วันให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดซึ่งมากกว่าซีเมนต์บอร์ดที่ไม่เติมกระดาษที่ร้อยละ 260 และได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงดัดของชิ้นงานจะพบว่าชิ้นงานที่มีการเติมเยื่อกระดาษลงไปทำให้มีพฤติกรรมจากเดิมเป็นการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) เปลี่ยนเป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) เมื่อมีการเติมปริมาณกระดาษเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 2.9 (ก) เนื่องจากมีการถ่ายโอนแรงจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใย เมื่อเมทริกซ์มีการรับแรงสูงสุดจนเกิดรอยแตกขึ้นมา (First crack) และเส้นใยที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ จะทำการดูดซับและมีการกระจายพลังงาน ในขณะที่หากเติมเยื่อกระดาษในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 8 จะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 2.9 (ข) เนื่องจากปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เยื่อกระดาษเกาะกันเป็นก้อนที่เรียกว่า “Balling effect” แสดงในรูปที่ 2.10



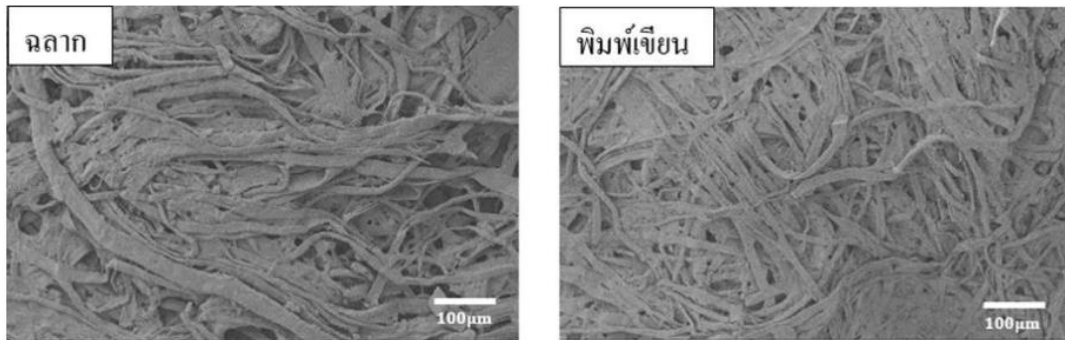
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการรับแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการเติมเยื่อกระดาษในปริมาณ ร้อยละ (ก) 0-8 (ข) 8-14 จากงานวิจัยของ Khorami และ Ganjian [11]



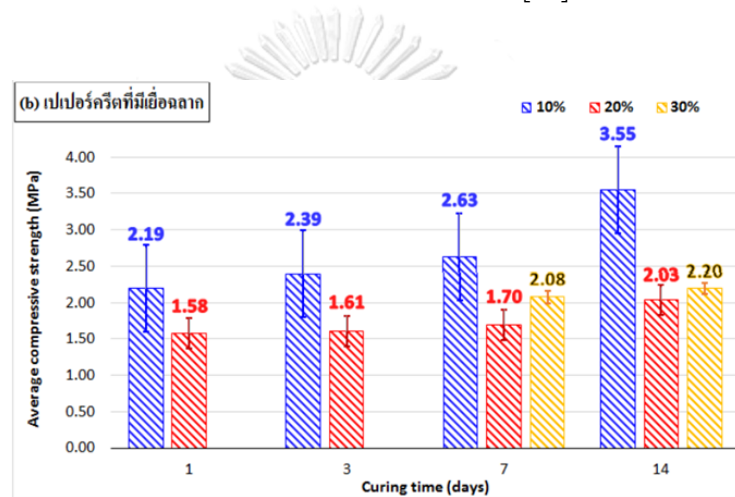
รูปที่ 2.10 เส้นใยเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนจากงานวิจัย Khorami และ Ganjian [11]

ณัฐวุฒิ ชิมกระโทก [30] ศึกษาการใช้กระดาษฉลากเป็นวัสดุร่วมในคอนกรีตปูพื้น โดยใช้กระดาษฉลากที่ลักษณะแตกต่างกัน ได้แก่ กระดาษฉลากเปียกปั่นหยาบ กระดาษฉลากเปียกไม่ปั่น และกระดาษฉลากแห้งปั่นละเอียด ซึ่งใช้กระดาษฉลากผสมในสัดส่วนร้อยละ 5, 10, 20, และ 30 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใช้สัดส่วนผสมของวัสดุติบปูนซีเมนต์ต่อทรายที่ 1:1.25 ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการอัดทิศทางเดียวที่ความดัน 10 เมกะพาสคัล บ่มชิ้นงานเป็นเวลา 28 วัน พบว่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดที่ 7.92 เมกะพาสคัล สำหรับชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษฉลากที่ผ่านการปั่นละเอียด ในสัดส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และค่าความต้านแรงดัดและความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผสมกระดาษฉลากในปริมาณที่มากขึ้น

วิภาวีและอารียา [33] ศึกษาเปรียบเทียบกระดาษฉลากเหลือทิ้งและกระดาษพิมพ์เขียนที่ใช้ และ ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 2.11 พบว่ากระดาษฉลากมีเส้นใยที่หนากว่ากระดาษพิมพ์เขียนและมีการจัดเรียงตัวไม่หนาแน่นเท่ากระดาษพิมพ์เขียนที่ใช้แล้ว และศึกษาลักษณะเยื่อกระดาษฉลาก โดยทำการทดลองนำเยื่อกระดาษไปแช่ในน้ำเปล่าและน้ำด่างที่มีค่า pH แตกต่างกัน พบว่าค่า pH ไม่มีผลทำให้ความยาวเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกระดาษฉลากมีความยาวเส้นใยอยู่ในช่วง 0.55-0.61 มิลลิเมตร มีความกว้างของเส้นใยอยู่ในช่วง 22.35-22.77 ไมครอน และเมื่อทำการทดสอบการซึมน้ำของกระดาษฉลากตามมาตรฐาน TAPPI 441 พบว่ากระดาษฉลากมีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษพิมพ์เขียน คาดว่าเนื่องจากยังคงมีคราบกาหลงเหลือจากการล้างทำความสะอาดไม่หมด นอกจากนี้ได้ทดลองนำกระดาษฉลากเตรียมเป็นวัสดุเปเปอร์กรีตขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ ในสัดส่วนร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายที่ 0.75:1 และเติมสารช่วยการไหลตัวที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มชิ้นงานที่ 1-14 วัน พบว่าชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมกระดาษฉลากร้อยละ 10 มีค่าความต้านแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 3.55 เมกะพาสคัล สำหรับการบ่ม 14 วัน ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาการบ่มส่งผลให้มีชิ้นงานมีค่าความต้านแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมกระดาษฉลากมากขึ้นส่งผลความต้านแรงอัดมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ปริมาณกระดาษที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นลดน้อยลง เนื่องจากกระดาษมีความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์

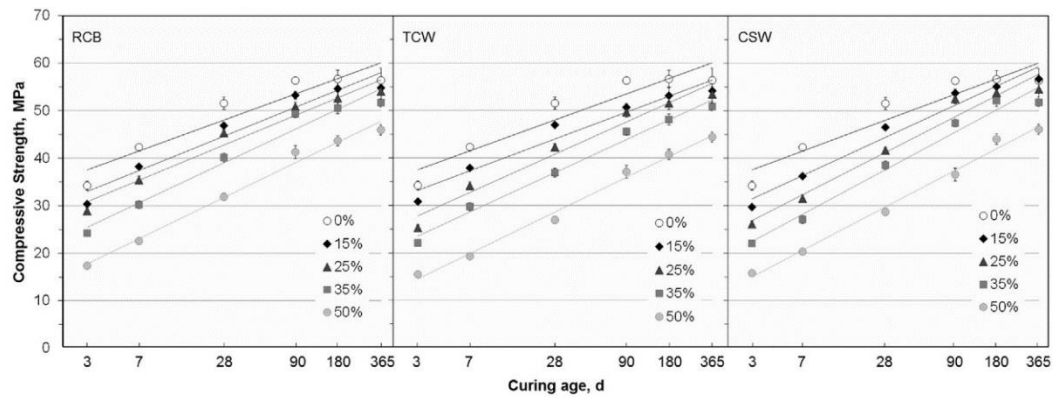


รูปที่ 2.11 โครงสร้างจุลภาคของกระดาศฉลากและกระดาศพิมพ์เขียนที่กำลังขยาย 150 เท่า จากงานวิจัยวิภาวีและอารียา [33]

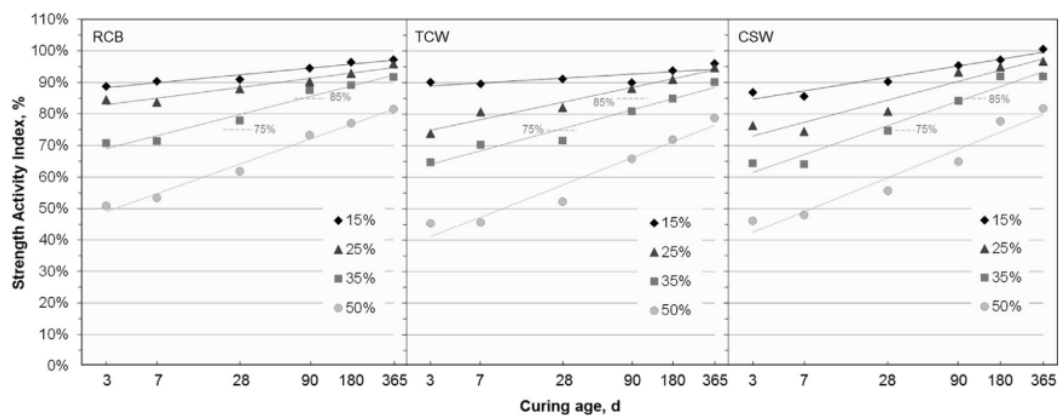


รูปที่ 2.12 ความต้านแรงอัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีต จากงานวิจัยวิภาวีและอารียา [33]

Pitarch และคณะ [37] ศึกษาเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของกระเบื้องเซรามิกอิฐมอญ (Red clay brick) และสุกษณ์ท์เซรามิกเหลือทิ้งเพื่อใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ ในสัดส่วนร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยใช้สัดส่วนผสมตัวเชื่อมประสานต่อทรายต่อน้ำที่ 1:3:0.5 โดยน้ำหนัก และนำชิ้นงานไปบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3-365 วัน ผลทดสอบความต้านแรงอัดแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าชิ้นงานที่ผสมผงเซรามิกเหลือทิ้งทั้ง 3 ชนิดให้ค่าความต้านแรงอัดที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม โดยค่าความต้านแรงอัดเพิ่มขึ้นมากกว่า 50 เมกะพาสคัล ที่อายุการบ่ม 365 วันสำหรับการแทนที่ด้วยผงเซรามิกร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก และผลการทดสอบ Strength activity index (SAI) แสดงในรูปที่ 2.13 เพื่อทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของผงเซรามิกเหลือทิ้งทั้ง 3 ชนิด พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยผงเซรามิกร้อยละ 25 โดยน้ำหนักขึ้นไป มีค่า SAI มากกว่าร้อยละ 75 และ 85 ที่อายุการบ่มหลังจาก 28 วันขึ้นไป ซึ่งได้ตรงตามมาตรฐานวัสดุปอซโซลาน



รูปที่ 2.13 ความต้านแรงอัดของชิ้นงานมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย อิฐมอญ (RCB) กระเบื้องเซรามิก (TCW) และสุขภัณฑ์เซรามิกเหลือทิ้ง (CSW) จากงานวิจัยของ Pitarch และคณะ [37]

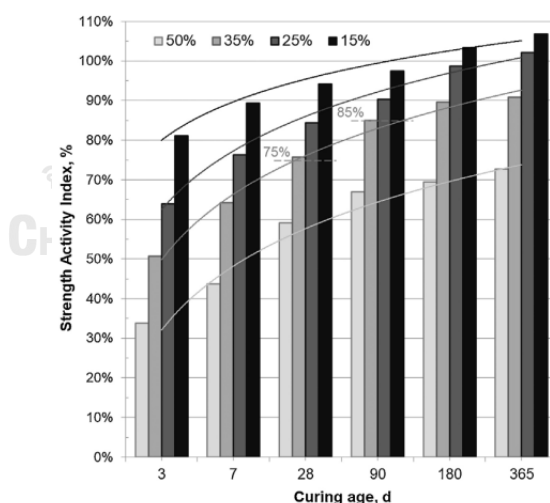


รูปที่ 2.14 SAI ของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยอิฐมอญ (RCB) กระเบื้องเซรามิก(TCW) และสุขภัณฑ์เซรามิกเหลือทิ้ง (CSW) จากงานวิจัยของ Pitarch และคณะ [37]

Li และคณะ [38] ศึกษาการใช้แจกันเซรามิกสโตนแวร์เหลือทิ้งเป็นสารเติมเต็มในซีเมนต์ โดยนำเซรามิกเหลือทิ้งมาบดละเอียดมีขนาดประมาณ 3.5 ไมครอนซึ่งขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ และมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินารวมกันถึงร้อยละ 84 โดยน้ำหนักออกไซด์ เพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก โดยชิ้นงานถูกนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7, 28, 90, และ 180 วัน พบว่าการเติมผงเซรามิกช่วยเพิ่มค่าความต้านแรงอัดได้มากกว่า 80 เมกะพาสคัล และเพิ่มค่าความต้านแรงดัดได้ถึง 10 เมกะพาสคัล โดยการเติมผงเซรามิกในช่วงแรก 7-28 วันจะส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง แต่เมื่อเวลาผ่านไป 90 วัน ความแข็งแรงของชิ้นงานมีการพัฒนาขึ้นเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากการมีปฏิริยาระหว่างผงเซรามิกและซีเมนต์ไฮเดรต โดยผงเซรามิกบางส่วนจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นขึ้น และการเกิดปฏิริยาปอซโซลานของผงเซรามิกโดยพื้นผิวของอนุภาคเซรามิกจะถูกจัดเตรียมเป็นพื้นที่การฟอร์มนิวเคลียส

แบบต่างกัน (Heterogeneous nucleation) ของผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนคลอไรด์พื้นผิวของซิลิกาฟุ้งในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของอนุภาคเซรามิกก่อให้เกิดสารประกอบซึ่งมีสมบัติเชื่อมประสานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคเซรามิกและซีเมนต์ไฮดรต และผลการวิเคราะห์ด้วย SEM/EDX แสดงให้เห็นชั้นของสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮดรต (C-A-S-H) ชั้นล้อมรอบอนุภาคเซรามิก

Reig และคณะ [39] ศึกษาประสิทธิภาพการใช้สุขภัณฑ์เซรามิกเหลือทิ้งเป็นวัสดุปอซโซลานผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยนำสุขภัณฑ์เซรามิกมาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 24 ไมครอน และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก ซีเมนต์เพสต์ถูกบ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-365 วัน พบว่าความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยสุขภัณฑ์เซรามิกร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก เมื่อทำการบ่มที่อายุ 180 วันขึ้นไป มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่มีการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานของสุขภัณฑ์เซรามิกเหลือทิ้งเกิดขึ้นช้า โดยเกิดขึ้นหลังจากผ่านการบ่มไปแล้ว 28 วันและมีการทำปฏิกิริยาดีขึ้นหลังจากผ่านไป 90 วัน ผลการทดสอบ SAI ของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยสุขภัณฑ์เซรามิกแสดงในรูปแบบที่ 2.15 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ในร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักมี SAI มากกว่าร้อยละ 75-85 ซึ่งตรงมาตรฐานที่กำหนดสำหรับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ เช่น ถ้ำลอย



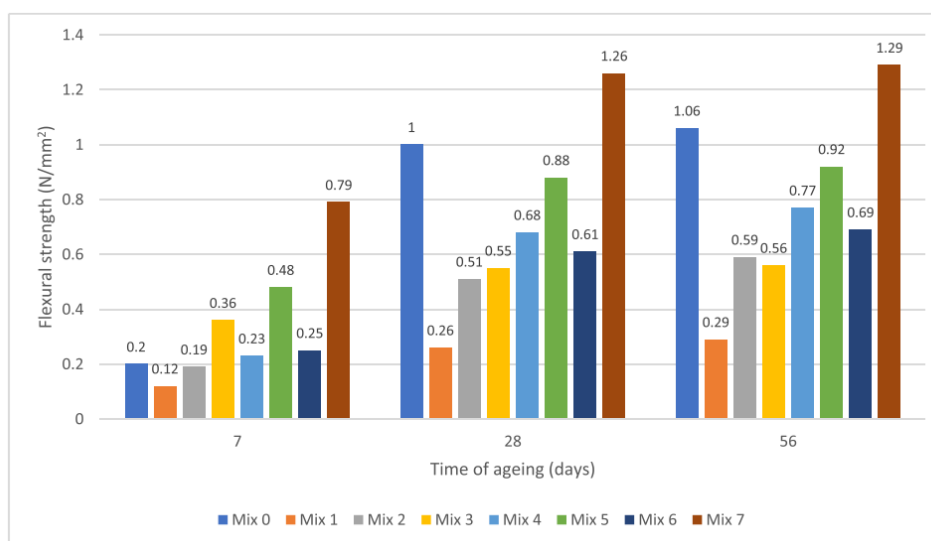
รูปที่ 2.15 SAI ขึ้นงานมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยสุขภัณฑ์เซรามิก

จากงานวิจัยของ Reig และคณะ [39]

Lavat และคณะ [40] ศึกษาการใช้เศษกระเบื้องมุงหลังคาเซรามิกเหลือทิ้งเป็นส่วนผสมวัสดุ ปอชโซลาน โดยนำไปบดละเอียดจนมีขนาดประมาณ 44 ไมครอนและนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ใน สัดส่วนร้อยละ 20, 25, 30, 35, 40 โดยน้ำหนัก ขึ้นงานถูกนำไปบ่มเป็นเวลา 1-180 วัน ผลการ ทดลองพบว่าการใช้เศษเซรามิกที่ผ่านกระบวนการเผาเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 20-30 โดย น้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมโดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง รวมถึงโลหะออกไซด์ที่มีอยู่ใน สารเคลือบเซรามิกไม่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงาน เนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นต่ำ และปฏิกิริยา ปอชโซลานของกระเบื้องเกิดขึ้นค่อนข้างช้า

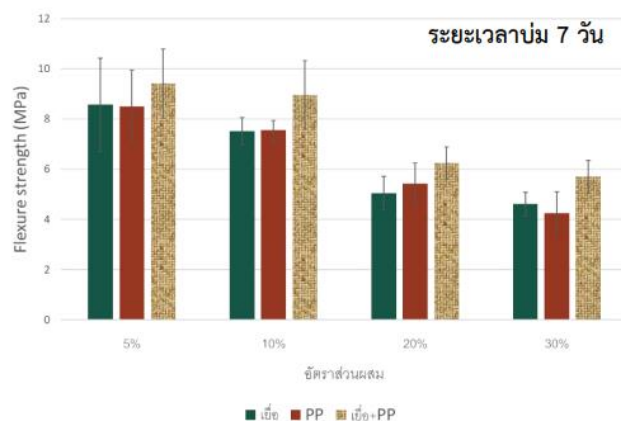
Awoyera และคณะ [41] ศึกษาผลกระทบเชิงกลของอิฐมวลเบาในการใช้เศษเซรามิกบด และกระดาษหนังสือพิมพ์รีไซเคิลแทนที่ใช้ทรายก่อสร้างในกระบวนการผลิต โดยกระดาษ หนังสือพิมพ์ถูกนำมาบดละเอียดและบดละเอียดจนมีขนาดในช่วง 125 – 4 มิลลิเมตร และกระเบื้องเซรามิก นำมาบดละเอียดมีขนาด 50 - 4.75 มิลลิเมตร แสดงสัดส่วนวัตถุดิบการเตรียมตัวอย่างในตารางที่ 2.6 จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่มีการใส่กระดาษร้อยละ 100 และ 75 มีค่าความต้านแรงดัดต่ำกว่า ชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษในปริมาณน้อยกว่าซึ่งแสดงในรูปที่ 2.16 เนื่องจากการแทนที่ด้วยกระดาษ ที่มากเกินไปทำให้ดูดซับน้ำไว้ในตัวเองมากเกินไปจนความจำเป็นสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงส่งผล ให้ความแข็งแรงลดลง และนอกจากนี้ชิ้นงานที่มีการเติมเซรามิกบดมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ มีการเติมทรายอย่างเดียวมีผลเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาปอชโซลาน และเนื่องจากในเซรามิกมี ปริมาณแคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิคอน และไอรอนสูง พบว่าชิ้นงานที่มีการใช้เซรามิกบดร้อยละ 100 มีการสร้างเจลแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตขึ้น และนอกจากนี้เฟสอะลูมินาในเซรามิกบดจะทำ ปฏิกิริยากับปูนขาวในซีเมนต์ซึ่งมีส่วนช่วยในการเติมเต็มช่องว่างส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่น ตารางที่ 2.6 สัดส่วนผสมชิ้นงานมอร์ตาร์จากงานวิจัย Awoyera และคณะ [41]

	Cement (%)	Wastepaper (%)	Ceramic (%)	Sand (%)
Mix 0	100	0	0	100
Mix 1	100	100	0	0
Mix 2	100	75	25	0
Mix 3	100	75	0	25
Mix 4	100	0	25	75
Mix 5	100	25	75	0
Mix 6	100	25	0	75
Mix 7	100	0	100	0



รูปที่ 2.16 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานมอดาร์จากงานวิจัยของ Awoyera และคณะ [41]

ณัฐภัทร์ และพศวัต [42] ศึกษาวัสดุเปเปอร์กรีตที่เตรียมจากกระดาษฉลากเหลือทิ้งร่วมกับเส้นใยโพลีโพรพิลีน (PP) ในสัดส่วนผสม 1:1 โดยมวล ที่สัดส่วนผสมร้อยละ 5, 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนกระดาษฉลากส่งผลให้เกิดสารประกอบ C-S-H ได้น้อย เนื่องจากเยื่อกระดาษฉลากมีความชอบน้ำจึงดูดซับน้ำไว้มากทำให้บริเวณโดยรอบมีน้ำไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในขณะที่เส้นใย PP มีความไม่ชอบน้ำจึงมีน้ำสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากกว่าการใช้กระดาษฉลาก โดยความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานที่ผสมระหว่างกระดาษฉลากและเส้นใย PP มีแนวโน้มสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้กระดาษฉลากหรือใช้เส้นใย PP เพียงอย่างเดียว แสดงในรูปที่ 2.17 เป็นผลมาจากการอยู่ร่วมกันของเส้นใยทำให้เกิดการสานตัวกันของเส้นใยขนาดเล็กและขนาดใหญ่ทำให้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเปเปอร์กรีต โดยปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการผสมเยื่อกระดาษฉลากและเส้นใย PP อยู่ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ระยะเวลาในการบ่มชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่นานขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดัดของชิ้นงาน นอกจากนี้การเพิ่มสัดส่วนของกระดาษฉลากและเส้นใย PP ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานลดต่ำลงเนื่องจากความหนาแน่นของเส้นใยกระดาษฉลากและเส้นใย PP มีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.17 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่ผ่านการบ่ม 7 วัน จากงานวิจัยณัฐภัทร์ และพศวัต [42]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กระดาษผสมกับปูนซีเมนต์ และการใช้เซรามิกเหลือทิ้งเป็นวัสดุปอซโซลาน มีผลการทดลองใกล้เคียงกันจึงทำให้ได้ข้อสรุปว่า

การใช้กระดาษผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงอัด ความต้านแรงดัด และความหนาแน่นลดต่ำลง ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมกระดาษ นอกจากนี้ระยะเวลาในการบ่มชิ้นงานที่นานขึ้นมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน

การใช้เซรามิกเหลือทิ้งเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อให้แทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของผงเซรามิกเหลือทิ้งเกิดขึ้นค่อนข้างช้า โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี ความละเอียด และลักษณะโครงสร้าง ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานจะมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าวัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึก

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และอุปกรณ์ในการดำเนินงาน

3.1.1 รายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์

วัสดุ อุปกรณ์	แหล่งที่มา
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
ทรายบดละเอียด 325 เมช	บริษัท ซีเบลโก้มีเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
กระดาษฉลากเหลือทิ้ง	บริษัท ไทยเบฟเวอเรจ จำกัด (มหาชน)
กระดาษพิมพ์เขียน	บ.ดับเบิล เอ จำกัด
เซรามิกพิทเซอร์	บ.คราวน์ เซรามิกส์ จำกัด
เส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	SDGEO MATERIAL CO.,LTD

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ตะแกรงร่อนเบอร์ 4
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 1 ตำแหน่ง รุ่น HJ-10000
- 3) เครื่องปั่นละเอียด
- 4) เครื่องผสมอาหาร รุ่น B5 Mixer บริษัท Machinery manufacturing Co., Ltd.
- 5) แม่พิมพ์โลหะ ขนาด 10.1x5 เซนติเมตร
- 6) เครื่องอัดชิ้นงานแรงดันทิศทางเดียว รุ่น ESE-373-00 บริษัท Toyo hydraulic equipment Co., Ltd.
- 7) หม้ออัดแรงดันไอน้ำ
- 8) กล้องฝาปิดสนิท
- 9) เตอบแห้ง บริษัท Binder Co., Limited
- 10) เวอร์เนียคาลิเปอร์ดิจิตอล รุ่น 1108 บริษัท Insize Co.,Ltd. (ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร)
- 11) เครื่องทดสอบความต้านแรงดัด (Universal testing machine) รุ่น 5843 บริษัท Instron Co., Ltd.

3.2 การศึกษาลักษณะของวัสดุดิบ

3.2.1 การกระจายตัวขนาดอนุภาค โดยวิเคราะห์การกระจายตัวอนุภาคของวัสดุดิบหลัก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทรายบดละเอียด และเซรามิกพิทเซอร์ ด้วยเทคนิค Dynamic laser scattering ใช้เครื่องวิเคราะห์ รุ่น Mastersizer 2000

3.2.2 องค์ประกอบทางเคมี โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทรายบดละเอียด กระจกฉลากเหลือทิ้ง และเซรามิกพิทเซอร์ กระจกฉลากถูกนำมาเผาให้กลายเป็นซีเมนต์ก่อนนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่ติดมากับกระจกฉลากซึ่งนอกเหนือจากเซลลูโลส ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น S8 Tiger ของบริษัท Bruker

3.2.3 องค์ประกอบทางเฟส โดยวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัสดุดิบ ได้แก่ ทรายบดละเอียด และเซรามิกพิทเซอร์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น AXS Model D8 Discover ของบริษัท Bruker ใช้ความยาวคลื่น Cu-K α และทำการวัดในช่วง 5-80 องศาของ 2 θ

3.2.4 โครงสร้างทางจุลภาค ทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุดิบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทรายบดละเอียด กระจกฉลากเหลือทิ้ง และพิทเซอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-IT500HR ของบริษัท JEOL ที่ 15.0 kV

3.3 วิธีการดำเนินงาน

3.3.1 การทดลองใช้กระจกฉลากและพิทเซอร์

ในงานวิจัยนี้พิทเซอร์จะถูกแทนที่ทรายบดละเอียดในสัดส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75, และ 100 โดยน้ำหนักของทรายบดละเอียด และใช้สัดส่วนวัสดุดิบซีเมนต์ต่อทรายบดละเอียดต่อกระจกฉลากต่อน้ำที่ 1 : 1 : 0.3 : 2 นำไปอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันทิศทางเดียวที่ความดัน 25 เมกะพาสคัลซึ่งเป็นแรงดันทั่วไปที่ใช้สำหรับการอัดขึ้นรูปในอุตสาหกรรม ทำการเปรียบเทียบชิ้นงานบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน และชิ้นงานที่บ่มออโตเคลฟเป็นเวลา 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การบ่มชิ้นงานด้วยวิธีออโตเคลฟ จะมีการใช้อุณหภูมิในการบ่มอยู่ในช่วง 160-210 องศาเซลเซียสในสภาวะปิดที่มีการให้ความดันสูง ซึ่งจะเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับด้วยวิธีการบ่มออโตเคลฟ และใช้อัตราการเร่งความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

ชิ้นงานมอร์ตาร์ใช้สำหรับเป็นชิ้นงานควบคุมในการศึกษาเปรียบเทียบความเหนียวกับวัสดุเปเปอร์กรีต โดยไม่มีส่วนผสมของฟิทเซอร์และกระดาษฉลากละเอียดใช้สัดส่วนวัตถุดิบปูนซีเมนต์ต่อทรายบดละเอียดต่อน้ำที่ 1:1:0.5 โดยสัดส่วนผสมวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.2 สูตรการทดลองเตรียมชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมกระดาษฉลากและฟิทเซอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์	ทราย	ฟิทเซอร์	กระดาษฉลาก	น้ำ
มอร์ตาร์	40	40	-	-	20
0P	23.26	23.26	-	6.98	46.51
25P	23.26	17.44	5.81	6.98	46.51
50P	23.26	11.63	11.63	6.98	46.51
75P	23.26	5.81	17.44	6.98	46.51
100P	23.26	-	23.26	6.98	46.51

ขั้นตอนวิธีการเตรียมชิ้นงานที่มีการผสมกระดาษฉลากและฟิทเซอร์

- นำกระดาษฉลากเหลือทิ้งในรูป 3.1 มาบั่นแห้ง และนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ขนาด 4 เมช เพื่อควบคุมขนาด



รูปที่ 3.1 กระดาษฉลากเหลือทิ้ง

- นำกระดาษฉลากที่ละเอียดแล้วผสมกับน้ำในเครื่องปั่นผสมอาหารโดยใช้ความเร็วรอบประมาณ 400 RPM เป็นเวลา 3 นาทีเพื่อให้กระดาษฉลากเกิดการแตกตัวออกจากกัน
- เติมทรายบดละเอียด ซีเมนต์ และฟิทเซอร์ในเครื่องปั่นผสมแล้วปั่นจนวัตถุดิบเข้ากันด้วยความเร็วรอบประมาณ 200 RPM เป็นเวลา 2 นาที
- ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดัน 25 MPa โดยใช้แม่พิมพ์โลหะ
- ปล่อยให้ชิ้นงานเซตตัวในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน

- 6) นำชิ้นงานบ่มขึ้นโดยใช้ผ้าเปียกหมาดคลุมชิ้นงานเป็นเวลา 7 วันใส่ในกล่องที่มีฝาปิดสนิทโดยทำการเปลี่ยนผ้าใหม่ทุก 3 วัน และทำการเปรียบเทียบผลกับชิ้นงานที่บ่มด้วยออตเคลฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและใช้อัตราเร่งความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 7) อบแห้งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงก่อนนำไปตรวจสอบลักษณะสมบัติ

3.3.2 การทดลองใช้กระดาษพิมพ์เขียนและพิทเซอร์

ได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนกระดาษฉลากเป็นกระดาษพิมพ์เขียนเป็นส่วนผสมชิ้นงานเปเปอร์กรีต โดยใช้สัดส่วนผสมเดียวกับการใช้กระดาษฉลากเหลือทิ้ง ซึ่งแสดงสัดส่วนวัตถุดิบดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรการทดลองที่มีกระดาษพิมพ์เขียนและพิทเซอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์	ทราย	พิทเซอร์	กระดาษพิมพ์เขียน	น้ำ
0P.DA	23.26	23.26	-	6.98	46.51
25P.DA	23.26	17.44	5.81	6.98	46.51
50P.DA	23.26	11.62	11.62	6.98	46.51
75P.DA	23.26	5.81	17.44	6.98	46.51
100P.DA	23.26	-	23.26	6.98	46.51

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานที่มีการผสมกระดาษพิมพ์เขียนและพิทเซอร์

- 1) นำกระดาษพิมพ์เขียนมาฉีกเพื่อให้เป็นชิ้นเล็กและทำการแช่น้ำทิ้งไว้ 1 คืนเพื่อให้กระดาษเปียกชุ่ม จากนั้นนำกระดาษที่เปียกแล้วมาปั่นละเอียด แล้วจึงนำไปกรองน้ำออกและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำกระดาษที่อบแห้งมาปั่นแห้งละเอียด ควบคุมขนาดโดยการนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4 เมชเพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับกระดาษฉลากปั่นละเอียด
- 3) นำกระดาษพิมพ์เขียนที่ละเอียดแล้วผสมกับน้ำในเครื่องปั่นผสมอาหาร โดยใช้ความเร็วรอบประมาณ 400 RPM เป็นเวลา 3 นาที
- 4) เติมทรายบดละเอียด ซีเมนต์ และพิทเซอร์ในเครื่องปั่นผสมแล้วปั่นจนวัตถุดิบเข้ากันด้วยความเร็วรอบประมาณ 200 RPM เป็นเวลา 2 นาที
- 5) ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดัน 25 MPa โดยใช้แม่พิมพ์โลหะ

- 6) ปล่อยให้ชิ้นงานเซตตัวในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน
- 7) นำชิ้นงานบ่มด้วยอโตเคลฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 8) อบแห้งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงก่อนนำไปตรวจสอบลักษณะสมบัติ

3.3.3 การทดลองการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพิทเซอร์

ได้ทดลองเติมเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นเส้นใยพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อช่วยเพิ่มความเหนียวของชิ้นงาน โดยเลือกสูตรการทดลองที่มีการเติมพิทเซอร์ในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.1 ได้แก่สูตรที่ใช้กระดาษฉลากร้อยละ 30 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และมีการแทนที่พิทเซอร์ร้อยละ 75 ของน้ำหนักทรายบดละเอียด มาทำการเติมเส้นใย PVA ในสัดส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์และยังคงใช้สัดส่วนผสมวัสดุดิบเกี่ยวกับการทดลองข้างต้นซึ่งแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สูตรการทดลองที่มีกระดาษฉลาก เส้นใย PVA และพิทเซอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์	ทราย	พิทเซอร์	กระดาษฉลาก	PVA	น้ำ
75P0.05PVA	22.99	5.75	17.24	6.89	1.15	45.98
75P0.1PVA	22.73	5.68	17.04	6.82	2.27	45.45
75P0.15PVA	22.47	5.62	16.85	6.74	3.37	44.94

หมายเหตุ 75P = การเติมพิทเซอร์อัตราส่วนร้อยละ 75 โดยน้ำหนักของทรายบดละเอียด

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานที่มีการผสมเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

- 1) นำกระดาษฉลากเหลือทิ้งที่ป่นละเอียดแล้วผสมเข้ากับเส้นใย PVA
- 2) นำส่วนผสมมาผสมกับน้ำในเครื่องปั่นผสมอาหาร โดยใช้ความเร็วรอบประมาณ 400 RPM เป็นเวลา 3 นาที
- 3) เติมทรายบดละเอียด ซีเมนต์ และพิทเซอร์ในเครื่องปั่นผสมแล้วปั่นจนวัสดุดิบเข้ากันด้วยความเร็วรอบประมาณ 200 RPM เป็นเวลา 2 นาที
- 4) ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดัน 25 MPa โดยใช้แม่พิมพ์โลหะ
- 5) ปล่อยให้ชิ้นงานเซตตัวในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน
- 6) นำชิ้นงานบ่มขึ้นโดยใช้ผ้าเปียกหมาดคลุมชิ้นงานเป็นเวลา 7 วันใส่ในกล่องที่มีฝาปิดสนิทโดยทำการเปลี่ยนผ้าใหม่ทุก 3 วัน
- 8) อบแห้งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงก่อนนำไปตรวจสอบลักษณะสมบัติ

3.4 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของชิ้นงาน

3.4.1 ความต้านแรงดัด (Flexural strength) ทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) แบบ 3 - Point bending ดังรูปภาพที่ 3.2 โดยใช้ระยะห่างจุดรองรับของปลายทั้งสองด้าน (Span length) คือ 8 เซนติเมตร และ ใช้ความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งคำนวณค่าความต้านแรงดัดได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\text{Flexural strength} = \frac{3Pl}{2bd^2} \quad (3.1)$$

$$\text{Flexural strain} = \frac{6Dd}{l^2} \quad (3.2)$$

โดย P = แรงกดที่สูงที่สุด (นิวตัน)

l = ระยะห่างจุดรองรับปลายทั้งสองด้าน (มิลลิเมตร)

b = ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

d = ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

D = ระยะยัดที่มากที่สุด (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบความต้านแรงดัดแบบ 3 - Point bending

3.4.2 ความเหนียว (Toughness) ความเหนียวของชิ้นงานเปเปอร์กรีตพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง Stress-strain

3.4.3 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ชิ้นงานเปเปอร์กรีตถูกนำมาวัดค่าความหนาแน่นโดยใช้ขนาดของชิ้นงาน ดังสมการที่ 3.3

$$D = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

โดย M = น้ำหนักแห้งชิ้นงาน (กรัม)

V = ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.4.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานวัดโดยใช้เทคนิคการแทนที่ด้วยน้ำ โดยนำชิ้นงานแช่ในน้ำให้อิ่มตัวเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและนำน้ำหนักเปียกและแห้งมาคำนวณ ดังสมการที่ 3.4

$$\text{การดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \quad (3.4)$$

3.4.5 องค์ประกอบเฟส (Phase composition) ชิ้นงานเปเปอร์กรีตถูกนำไปบดละเอียดเพื่อศึกษาองค์ประกอบเฟส ด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น AXS Model D8 Discover ของบริษัท Bruker ใช้ความยาวคลื่น Cu-K α และทำการวัดในช่วง 5 - 80 องศาของ 2 θ

3.4.5 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-IT500HR ของบริษัท JEOL ที่ 15.0 kV โดยใช้กำลังขยายที่ 1000 5000 และ 10000 เท่า

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

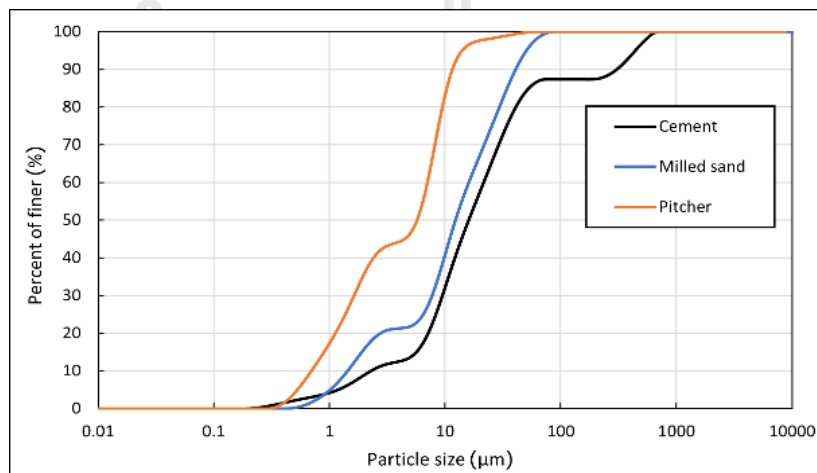
4.1.1 การกระจายตัวขนาดอนุภาค (Particle size distribution)

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทราบละเอียด และพิทเซอร์ แสดงค่าการกระจายตัวดังตารางที่ 4.1 และจากรูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวแบบสะสมของขนาดอนุภาควัสดุดิบ จะเห็นได้ว่าค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ ทราบละเอียด และพิทเซอร์คือ 15.95, 12.25, และ 6.57 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งพิทเซอร์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าขนาดอนุภาคทราบละเอียด และจากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟการกระจายตัวแบบปริมาณของขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ โดยแสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์มีการกระจายตัวขนาดของอนุภาคที่ค่อนข้างกว้างเมื่อเทียบกับทราบละเอียดและพิทเซอร์ที่มีการกระจายแบบ 2 ช่วง หรือที่เรียกว่ามีการกระจายตัวแบบ Bimodal

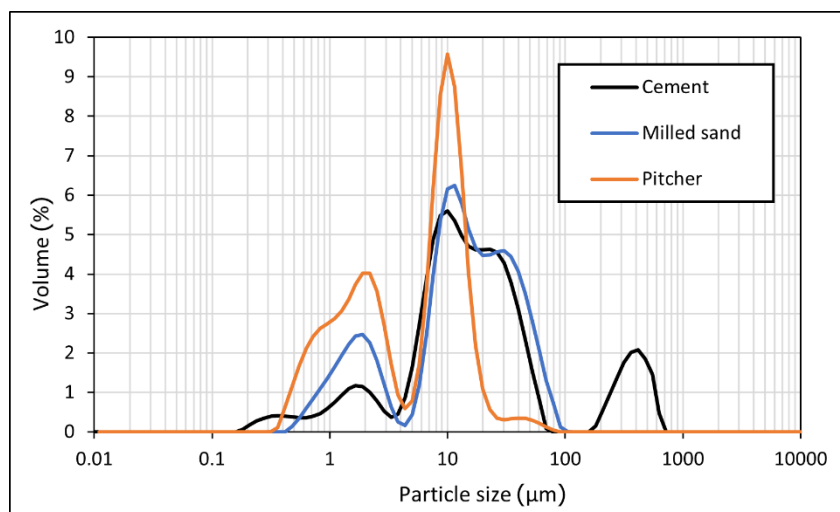
ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวขนาดอนุภาค

วัสดุดิบ	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)
ปูนซีเมนต์	2.27	15.95	305.99
ทราบละเอียด	1.43	12.25	40.59
พิทเซอร์	0.80	6.57	13.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาควัสดุดิบกับการกระจายตัวแบบสะสม



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาควัดดูติบกับการกระจายตัวแบบปริมาณ

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

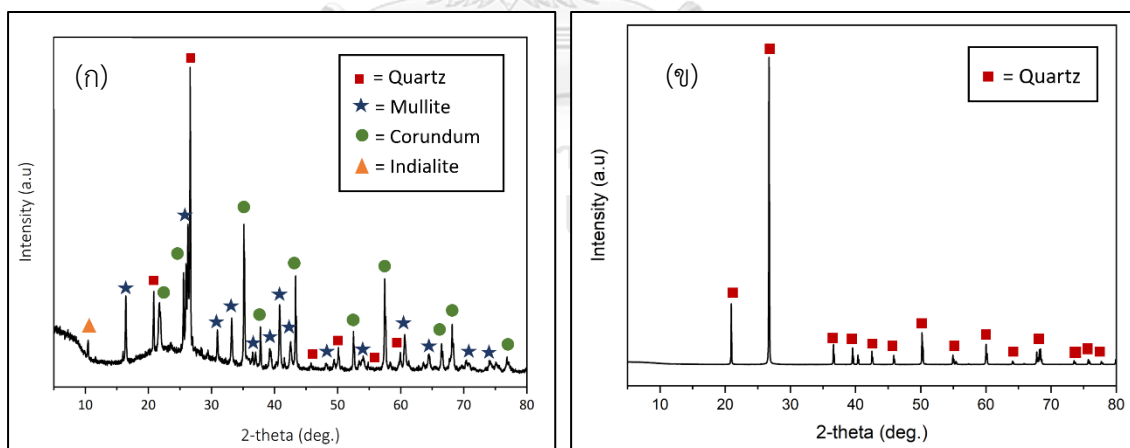
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุบดดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากที่สุดร้อยละ 71.14 ซึ่งได้มาจากการเผาหินปูนในกระบวนการผลิต และรองลงมาคือซิลิกา (SiO₂) ร้อยละ 15.92 ในขณะที่ทรายบดละเอียดมีปริมาณซิลิกาอยู่ถึงร้อยละ 99.29 พิทเซอร์ที่ได้รับมาจากงานชามสโตนแวร์เหลือทิ้งมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินา (Al₂O₃) รวมกันถึงร้อยละ 91.71 และมีปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ร้อยละ 1.38 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงมาตรฐาน ASTM-C618 สำหรับวัสดุปูซโซลาน และซีเมนต์ของกระดาชฉลากเหลือทิ้งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากที่สุดถึงร้อยละ 56.98 ซึ่งมาจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมกระดาชเพื่อช่วยให้กระดาชมีสีขาวและมีความทึบแสง [43] รองลงมาคือฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P₂O₅) ร้อยละ 14.74 คาดว่ามาจากสีในกระดาชฉลาก และมีปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ร้อยละ 13.05 มาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดขวดแก้ว ทำให้ยังคงหลงเหลือติดมากับกระดาชฉลาก ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 4.25 ของกระดาชฉลาก

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)										
	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	อื่นๆ
ซีเมนต์	1.33	0.29	3.90	15.92	0.09	2.62	71.14	3.54	0.50	0.26	0.39
ฟิทเซอร์	0.66	0.69	38.58	53.13	0.14	0.14	1.39	1.38	2.57	0.70	0.64
ทราย	0.01	-	0.52	99.29	0.01	0.01	0.03	0.04	0.02	-	0.06
กระดาษ (ซีเมนต์)	1.01	13.05	3.28	7.19	14.74	0.28	56.98	1.07	0.21	1.58	0.60

4.1.3 องค์ประกอบทางเฟส (Phase composition)

รูปที่ 4.3 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของฟิทเซอร์และทรายบดละเอียด จะเห็นได้ว่าทรายบดละเอียดประกอบไปด้วยผลึกควอตซ์เพียงอย่างเดียว ในขณะที่ฟิทเซอร์ ประกอบด้วยควอตซ์แบบอสัณฐาน (Amorphous) มุลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), และคอร์รันดัม (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบทางเฟสหลัก และพบเฟสอินเดียมไคท์ ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) คาดว่ามาจากการเติมทัลคัม (Talcum, $3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ในฟิทเซอร์

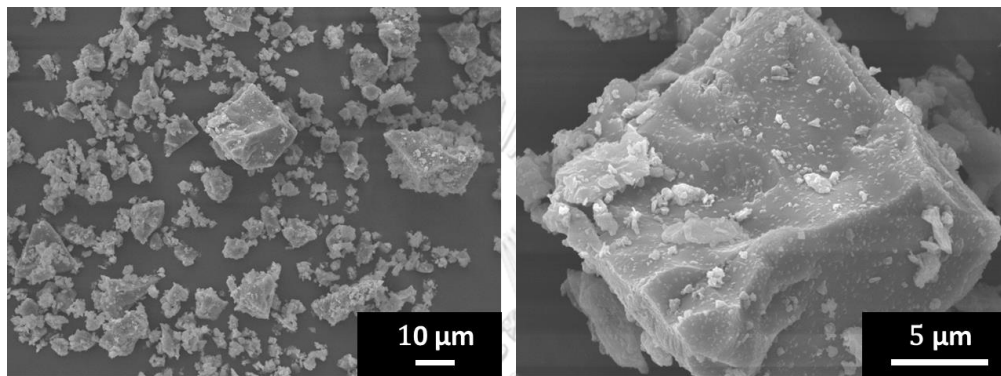


รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของ (ก) ฟิทเซอร์ และ (ข) ทรายบดละเอียด

4.1.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า โดยแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของปูนมีลักษณะเป็นก้อนที่มีขนาดแตกต่างกัน รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของทรายบดละเอียดกำลังขยาย 1000 และ

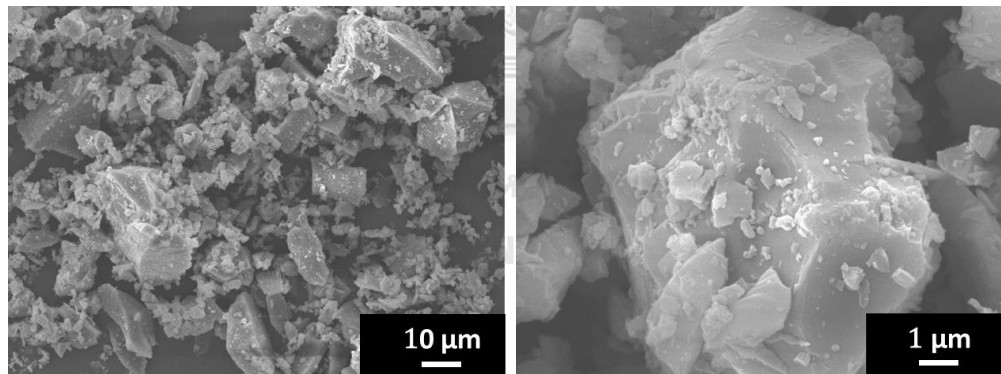
10000 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอนุภาคที่มีลักษณะอนุภาคขอบเหลี่ยมในขนาดต่างๆ และมีพื้นผิวเรียบคล้ายคลึงกับโครงสร้างจุลภาคของพิทเซอร์ที่แสดงในรูปที่ 4.6 มีลักษณะอนุภาคไม่สมมาตร (Irregular shape) ที่มีขนาดต่างกันและรูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของกระดาษฉลากเหลือทิ้งที่กำลังขยาย 250, 500, 1000 และ 5000 เท่า แสดงให้เห็นว่าเส้นใยกระดาษฉลากเหลือทิ้งมีลักษณะคล้ายริบบิ้นที่มีขนาดแตกต่างกัน และพบอนุภาคที่เกาะอยู่ตามเส้นใยคาดว่าเป็นอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต



(ก) 1000 เท่า

(ข) 5000 เท่า

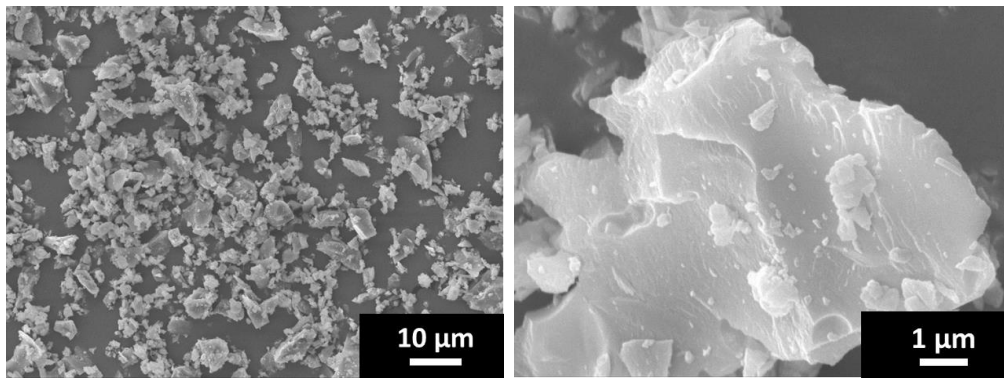
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์



(ก) 1000 เท่า

(ข) 10000 เท่า

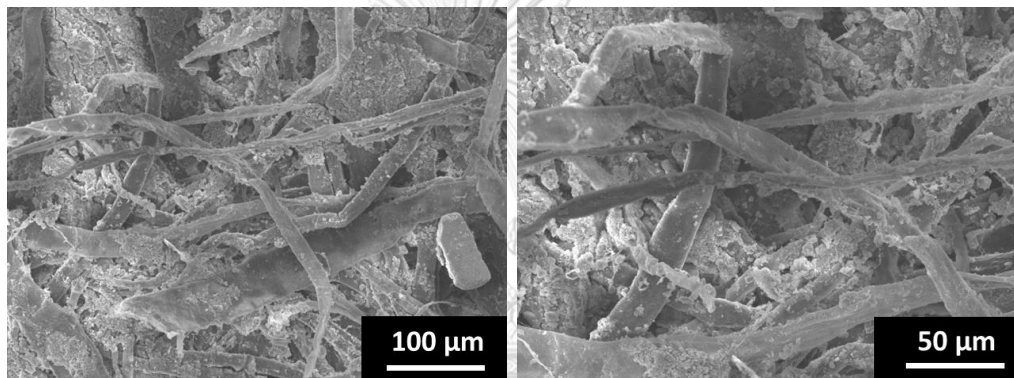
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของทรายบดละเอียด



(ก) 1000 เท่า

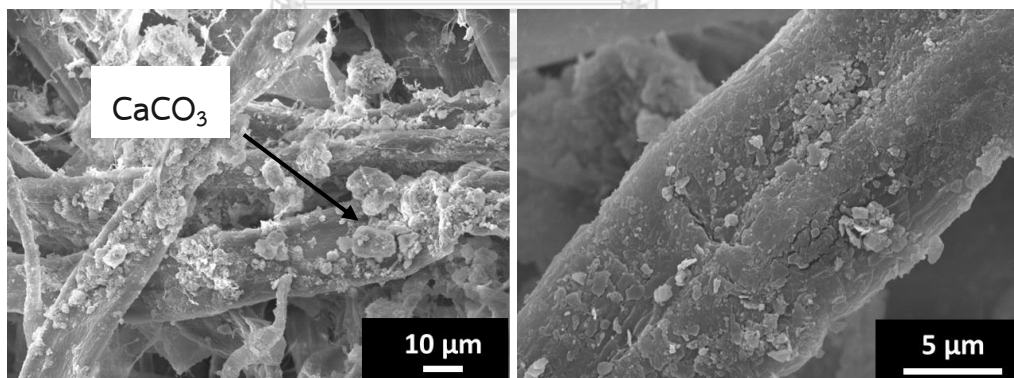
(ข) 10000 เท่า

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของพิทเซอร์



(ค) 250 เท่า

(ข) 500 เท่า



(ค) 1000 เท่า

(ง) 5000 เท่า

รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของกระดาศฉลากเหลือทิ้ง

4.2 ความต้านแรงดัด (Flexural strength)

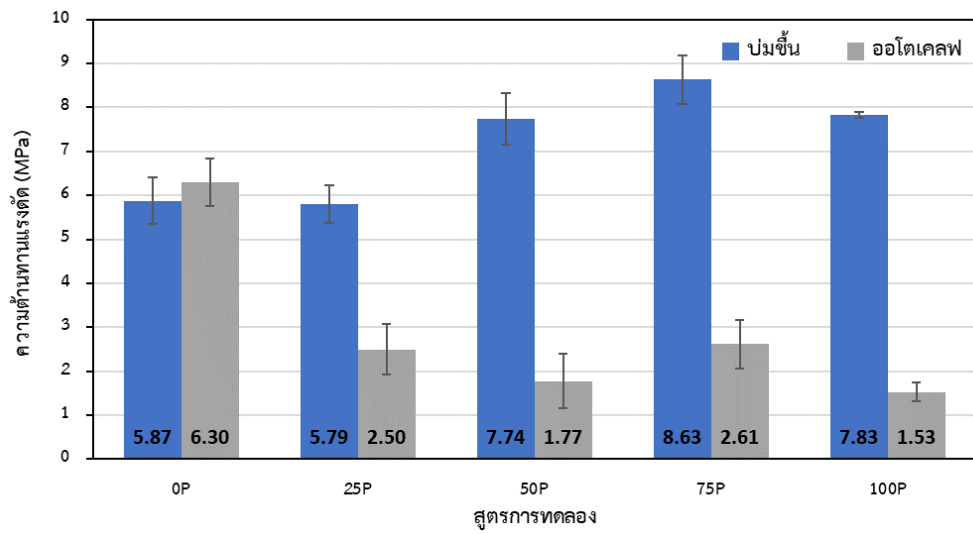
4.2.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและฟิซเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

การใช้เส้นใยเซลลูโลสเป็นตัวช่วยในการเสริมแรงให้แก่ซีเมนต์คอมโพสิตจะช่วยทำให้ลดความเปราะของเมทริกซ์ได้และช่วยเพิ่มความทนทานให้แก่วัสดุ เนื่องจากเส้นใยมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานจากเมทริกซ์ สามารถต้านทานต่อการแตกร้าวและยับยั้งการเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Micro crack) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เส้นใยเซลลูโลสมีประโยชน์ในด้านลดการนำความร้อน และเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเสียง [41]

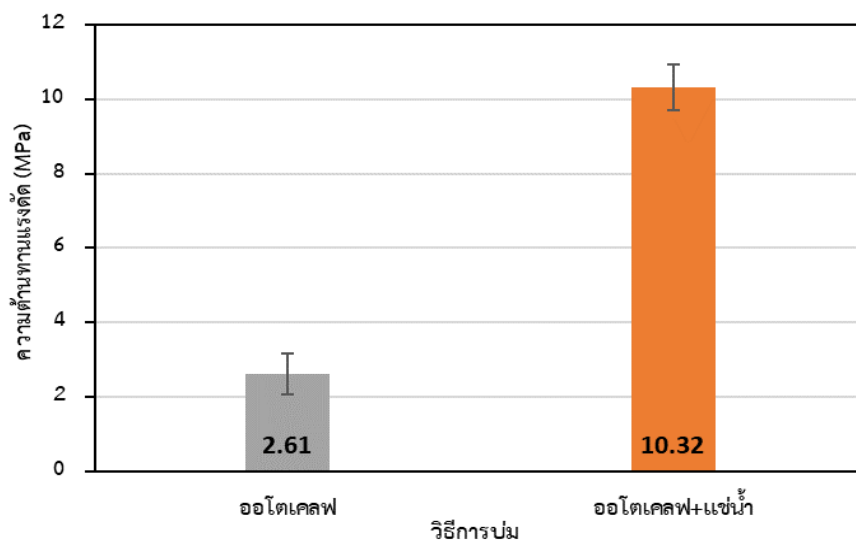
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความต้านแรงดัดเปรียบเทียบชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่บ่มขึ้นในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน และบ่มในอโตเคลฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสที่มีการแทนที่ด้วยปริมาณฟิซเซอร์ที่แตกต่างกัน และทุกสูตรมีการใช้กระดาษฉลากเหลือทิ้งที่ร้อยละ 30 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ พบว่าชิ้นงานที่บ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มให้ค่าความต้านแรงดัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยฟิซเซอร์ โดยชิ้นงานสูตร 75P ที่มีการใช้ฟิซเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดที่ 8.63 เมกะพาสคัล แต่การเติมในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 75 มีแนวโน้มจะให้ค่าความต้านแรงดัดที่ลดลง โดยชิ้นงานที่มีการเติมฟิซเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียดทั้งหมดหรือสูตร 100P ให้ค่าความต้านแรงดัดที่ 7.83 เมกะพาสคัลซึ่งน้อยกว่าสูตรการแทนที่ฟิซเซอร์ร้อยละ 75 แต่ยังคงสูงกว่าชิ้นงานสูตร OP ซึ่งเป็นสูตรที่ไม่มีการเติมฟิซเซอร์ให้ค่าความต้านแรงดัดอยู่ที่ 5.87 เมกะพาสคัล และเนื่องจากวัสดุเปเปอร์กรีตในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานความแข็งแรงสำหรับผลิตภัณฑ์นี้ ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดัดกับมาตรฐานไฟเบอร์ซีเมนต์แผ่นเรียบ โดยค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทุกสูตรที่มีการแทนที่ของปริมาณฟิซเซอร์มีค่าความต้านแรงดัดใกล้เคียงความแข็งแรงของมาตรฐาน ASTM-C1186 และมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 1427-2540 สำหรับผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์แผ่นเรียบที่ปราศจากแร่ใยหิน ซึ่งได้ระบุไว้ว่าสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดที่หนึ่งต้องมีค่าความต้านแรงดัดมากกว่า 4 เมกะพาสคัล [44, 45] และชิ้นงานที่มีการแทนที่ฟิซเซอร์ร้อยละ 50, 75, และ 100 โดยน้ำหนักมีค่าความต้านแรงดัดใกล้เคียงความแข็งแรงมาตรฐาน มอก.ชนิดที่สองซึ่งต้องมีค่าความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์มากกว่า 7 เมกะพาสคัล โดยการนำฟิซเซอร์แทนที่ทรายบดละเอียดช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lavat และคณะ (2009) [40] และงานวิจัยของ Li และคณะ (2020) [38]

เนื่องจากปริมาณพิทเซอร์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าทรายบดละเอียดและซีเมนต์ ทำให้บางส่วนของอนุภาคพิทเซอร์จะเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างซีเมนต์และทรายบดละเอียด และการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของพิทเซอร์ทำให้เกิดสารประกอบซึ่งมีสมบัติเป็นเฟสเชื่อมประสานซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคในโครงสร้างทำให้ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานเบเปเปอร์กรีต [38] และการมีปริมาณแอลคาไลน์ในองค์ประกอบทางเคมีของพิทเซอร์ช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงต้นของการบ่มได้ [40] นอกจากนี้พิทเซอร์ได้ผ่านกระบวนการบดจึงทำให้มีขอบเหลี่ยมมุมมากกว่าทรายบดละเอียดทำให้สามารถช่วยเพิ่มการยึดเกาะได้ดีกว่าการใช้ทรายบดละเอียดเพียงอย่างเดียว [46] โดยทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าชิ้นงานที่ทำการบ่มในอโตเคลฟ ความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลงมากกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการแทนที่พิทเซอร์ จึงได้สันนิษฐานว่าเกิดจากสองสาเหตุหลักได้แก่ การมีปริมาณโซเดียมออกไซด์ตกค้างที่กระดาชฉลาก ทำให้โซเดียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับพิทเซอร์ภายใต้ความร้อนและความดันสูงก่อให้เกิดสารประกอบที่ส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลง และการมีน้ำไม่เพียงพอที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากการวิเคราะห์สาเหตุไม่มีน้ำเพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงได้ทำการเลือกสูตร 75P ซึ่งให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดสำหรับการบ่มขึ้นมาทำการทดลองเพิ่มเติมโดยขึ้นรูปชิ้นงานและทิ้งให้เซตตัวหนึ่งคืน จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่น้ำ 10 นาทีก่อนนำไปบ่มในอโตเคลฟที่อุณหภูมิเดียวกัน ผลการทดสอบความต้านแรงดัดเปรียบเทียบชิ้นงานที่บ่มด้วยอโตเคลฟที่ทำการแช่น้ำก่อนบ่มและไม่แช่น้ำแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าชิ้นงานที่มีการแช่น้ำก่อนนำไปเข้าอโตเคลฟมีค่าความต้านแรงดัดที่ 10.32 เมกะพาสคัลซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการแช่น้ำก่อนบ่มอยู่ถึง 3.95 เท่า เนื่องจากการนำชิ้นงานไปแช่น้ำก่อนบ่มด้วยอโตเคลฟ ทำให้ชิ้นงานมีความชื้นที่มากเพียงพอต่อการเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ซึ่งส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและฟิซเซอร์

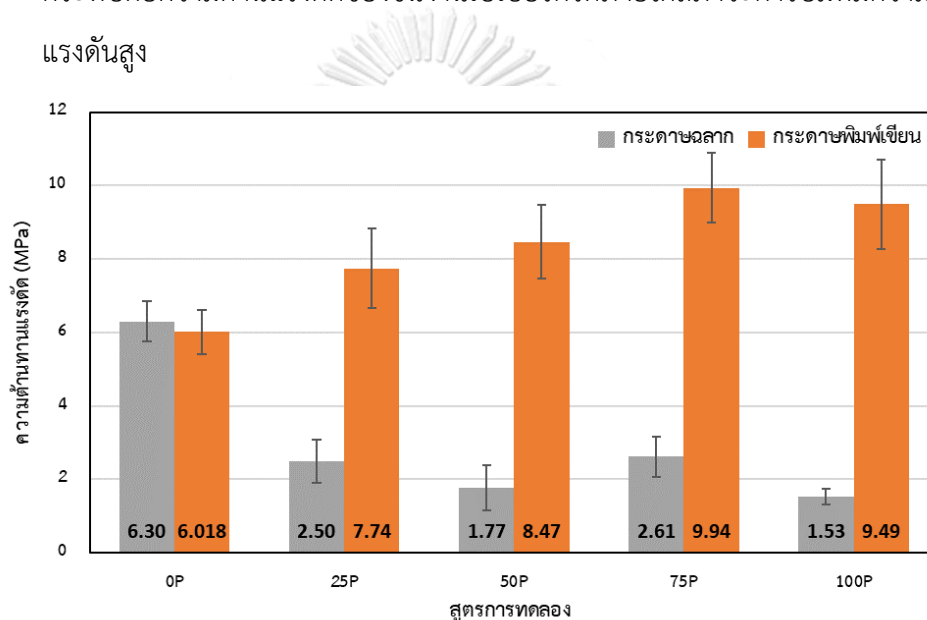


รูปที่ 4.9 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่ฟิซเซอร์ร้อยละ 75 และมีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน

4.2.2 การศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนและฟิซเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

จากการสันนิษฐานในว่าโซเดียมออกไซด์ในกระดาษฉลากมีผลกระทบต่อวัสดุเปเปอร์กรีตภายใต้การบ่มด้วยออตเคลฟ จึงได้ทดลองการศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนแทนการใช้กระดาษฉลากในวัสดุเปเปอร์กรีต เนื่องจากกระดาษพิมพ์เขียนไม่มีปริมาณโซเดียมออกไซด์เมื่อเทียบกับกระดาษฉลาก จึงได้ทำการทดลองโดยใช้กระดาษพิมพ์เขียนและส่วนผสมในสัดส่วนเดียวกัน และนำไปบ่มด้วยออตเคลฟที่อุณหภูมิเดียวกัน

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบความต้านแรงดัดระหว่างชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียน จะเห็นว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียนมีความต้านแรงดัดมากกว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากค่อนข้างมาก โดยสูตรการทดลองที่ผสมกระดาษพิมพ์เขียนที่มีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 75 โดยน้ำหนักหรือสูตร 75P ให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุด คือ 9.94 เมกะพาสคัล รองลงมาเป็นสูตร 100P, 50P, 25P, และ 0P ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าไซเดียมออกไซด์ที่ค้างอยู่บนกระดาษฉลากส่งผลกระทบต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตภายใต้สภาวะการบ่มที่มีความร้อนและแรงดันสูง



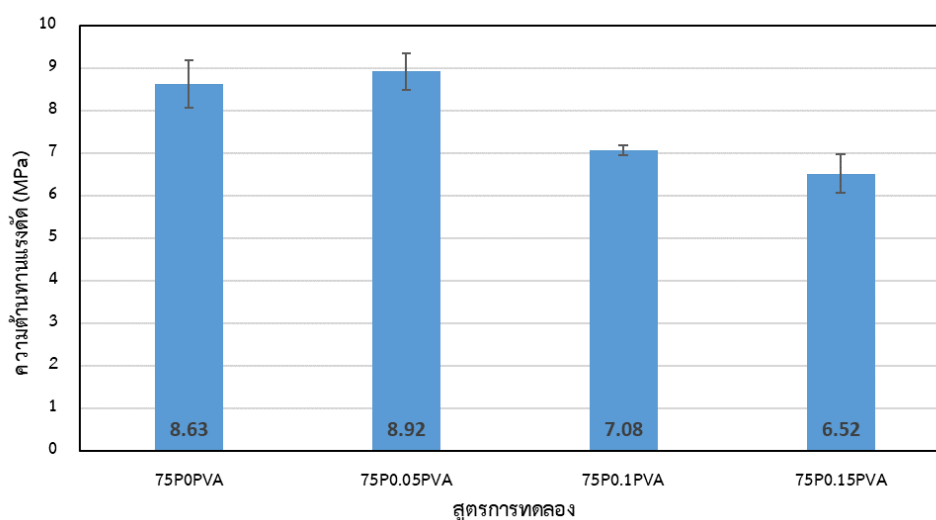
รูปที่ 4.10 ความต้านแรงดัดระหว่างชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีผสมกระดาษฉลากและชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระดาษพิมพ์เขียนภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟ

4.2.3 การศึกษาการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพิทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

การศึกษาการใช้เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมกับการใช้เส้นใยจากเศษกระดาษฉลากในการเสริมแรงให้แก่วัสดุ เนื่องจากในระยะยาวแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเป็นด่างสูงในซีเมนต์จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเส้นใยเซลลูโลสซึ่งจะส่งผลในด้านความทนทาน (Durability) ของวัสดุคอมโพสิต [47] ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้เส้นใย PVA เนื่องจากหาได้ง่าย มีราคาถูก รวมถึงเป็นเส้นใยที่มีความ

แข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูง รวมทั้งสามารถต้านทานแอลคาไลน์ได้ดีได้ดี และไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการบ่มคอนกรีต โดยการใช้เส้นใยตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป (Hybrid fiber) ที่มีชนิด ความยาวและสภาพยืดหยุ่นของเส้นใยที่แตกต่างกันจะช่วยพัฒนาพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเครียดของวัสดุ และพัฒนาการรับแรงของวัสดุได้ดีกว่าการใช้เส้นใยชนิดเดียว [48] ดังนั้นจึงได้ทดลองทำการเลือกสูตรที่ให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุด นั่นคือสูตร 75P ที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากร้อยละ 30 และมีการแทนที่พิทเซอร์ร้อยละ 75 บ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วันมาทำการเติมเส้นใย PVA ในสัดส่วน 0.05, 0.1, และ 0.15 โดยนำหนักปูนซีเมนต์

ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากร่วมกับเส้นใย PVA และพิทเซอร์แสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าการเติมเส้นใย PVA ในสัดส่วน 0.05 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดัดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 8.92 เมกะพาสคัลซึ่งสูงกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมเส้นใย PVA แต่เมื่อเติมเส้นใย PVA ในปริมาณที่มากกว่า 0.1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ขึ้นไปความต้านแรงดัดมีแนวโน้มที่จะลดต่ำลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khormi และ Ganjian (2013) [11] เนื่องจากเส้นใยที่มากเกินไปทำให้เกิดการกระจายตัวได้ไม่ดี มีการยึดเกาะกันเป็นก้อนกลมซึ่งนำไปสู่จุดอ่อนแรง (Weak point) ในวัสดุ และปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปทำให้อุณหภูมิของซีเมนต์ไฮเดรตไม่เพียงพอที่จะครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของเส้นใยทำให้เกิดการหยุดชะงักของปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิต



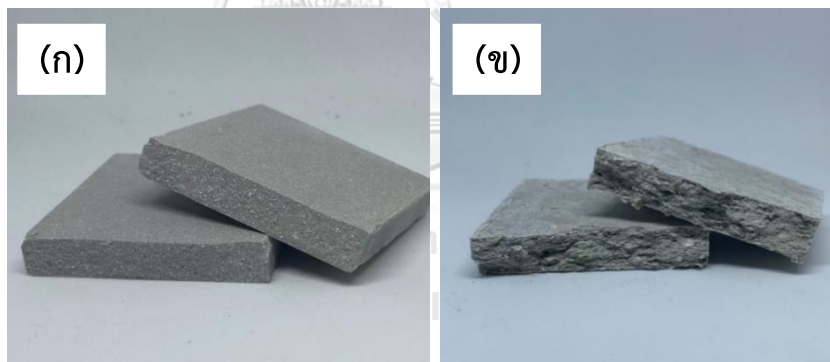
รูปที่ 4.11 ความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลาก เส้นใย PVA และมีการพิทเซอร์ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก บ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน

4.3 ความเหนียว (Toughness)

4.3.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพิทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

ความเหนียวของชิ้นงานเปเปอร์กรีตพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เนื่องจากผลการทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ทำการบ่มขึ้นในอุณหภูมิห้องให้ผลที่ดีกว่าชิ้นงานที่บ่มอบโตเคลฟ ดังนั้นความเหนียวของเปเปอร์กรีต จึงทำการพิจารณาจากชิ้นงานที่ทำการบ่มขึ้นในอุณหภูมิห้อง โดยตัวอย่างของชิ้นงาน 1 ใน 5 ที่มีค่าความต้านแรงดัดใกล้ค่าความต้านแรงดัดเฉลี่ยถูกเลือกมาเป็นตัวแทนในการพิจารณา

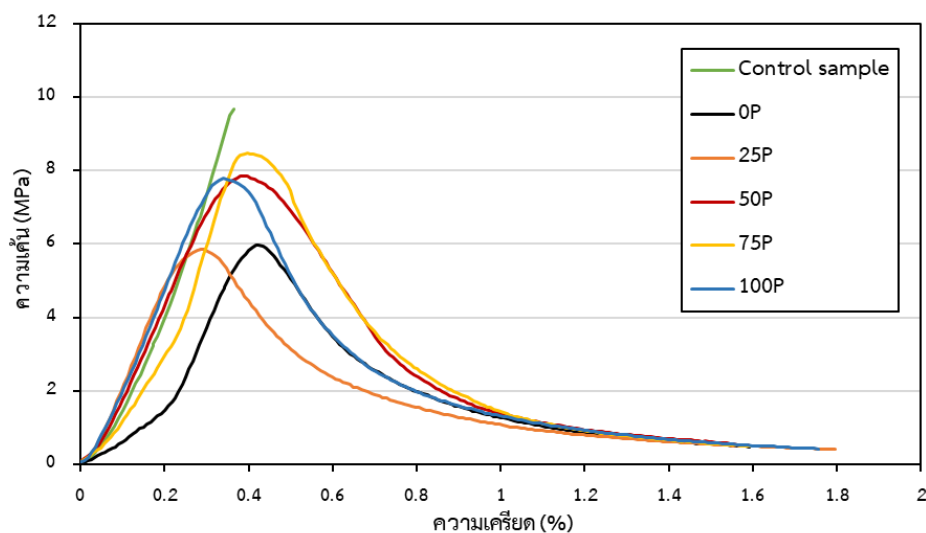
จากรูปที่ 4.12 แสดงหน้าตัดของชิ้นงานสูตรควบคุมเปรียบเทียบกับชิ้นงานเปเปอร์กรีตและรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเปเปอร์กรีต เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมซึ่งไม่ได้มีการเติมกระดาษฉลากและพิทเซอร์ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเติมกระดาษฉลากเหลือทิ้งผสมกับปูนซีเมนต์ในชิ้นงานช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงาน เนื่องจากคอนกรีตหรือสูตรที่ใช้ควบคุมเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงแต่มีการแตกหักแบบเปราะไม่มีช่วงสภาพยืดหยุ่นของชิ้นงาน (Elastic range)



รูปที่ 4.12 หน้าตัดของชิ้นงาน (ก) ชิ้นงานสูตรควบคุม (ข) ชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษ

ดังนั้นการเติมเส้นใยในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกล เช่น การรับแรงดัด การกระจายพลังงานและความเหนียว โดยพฤติกรรมในการใช้เส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตเกี่ยวข้องกับ 3 ช่วง ดังต่อไปนี้ ช่วงแรกกราฟระหว่างความเค้น-ความเครียดจะมีความชันมากหรือจะเรียกว่าช่วงที่มีสภาพยืดหยุ่นแสดงถึงการรับแรงด้วยเมทริกซ์จนถึงจุดรับแรงสูงสุดและมีรอยแตก (Crack) เกิดขึ้นมา หลังจากนั้นช่วงที่สองกราฟเริ่มมีความชันลดลงมามากหรือน้อยขึ้นกับความเหนียวของเส้นใยในชิ้นงาน โดย

ความเค้นจะถูกส่งผ่านจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยขึ้นกับการเสริมแรงของเส้นใยและการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และช่วงสุดท้ายกราฟมีความชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงการแตกหักเสียหายของชิ้นงาน [47, 49]



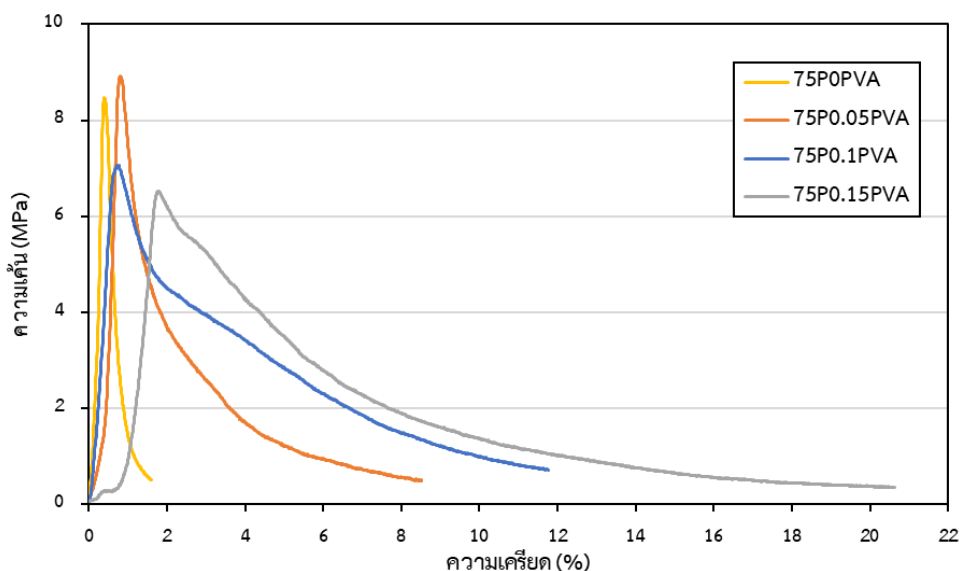
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและฟิเบอร์ผ่านกระบวนการบ่มขึ้น 7 วัน

4.3.2 การศึกษาการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และฟิเบอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

การใช้เส้นใย 2 ชนิดเพื่อปรับปรุงสมบัติความเหนียวและการกระจายพลังงานของวัสดุขึ้นขึ้นกับลักษณะเฉพาะของเส้นใย เช่น ความยาว ปริมาณการใช้ มอดุลัสยืดหยุ่นและความต้านทานแรงดึงของเส้นใย โดยเส้นใยกระดาษฉลากนั้นมีค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength) อยู่ที่ 2733 เมกะพาสคัล [33] และเส้นใย PVA มีความต้านแรงดึงอยู่ที่ 1400-1600 เมกะพาสคัล [50]

จากรูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากสัดส่วน 0.3 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และเติมเส้นใย PVA ในปริมาณต่างๆ พบว่าชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการเติมเส้นใยจะช่วยเพิ่มระยะแอนของชิ้นงาน โดยสัดส่วนที่เหมาะสมคือการเติมเส้นใย PVA ในสัดส่วน 0.05 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะ

ช่วยเพิ่มความเหนียวของชิ้นงาน และเพิ่มระยะยืดมากกว่า 5.34 เท่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากเส้นใย PVA และพิทเซอร์ร้อยละ 75 ผ่านกระบวนการบ่มขึ้น 7 วัน

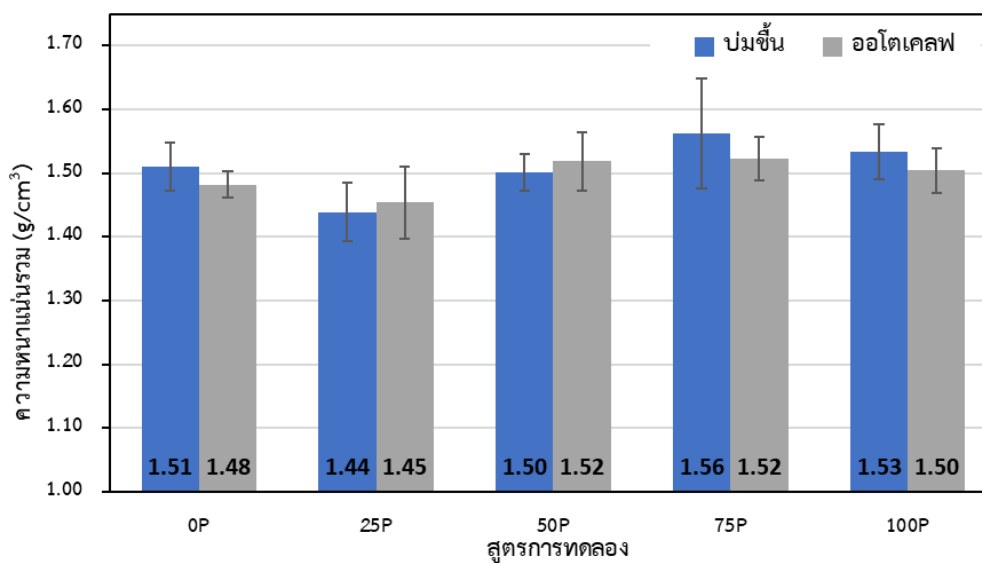
4.4 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) และการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

4.4.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพิทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

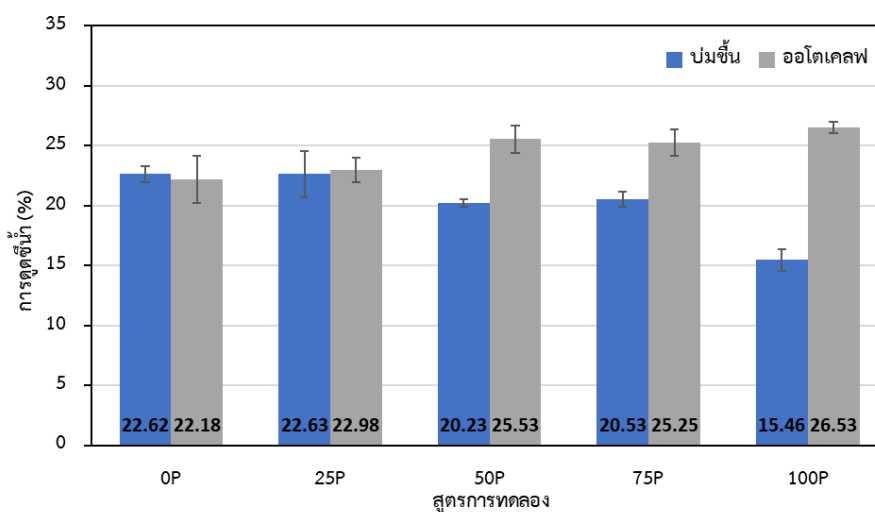
ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากเหลือทิ้งและการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ในปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบ่มขึ้นและบ่มอโตเคลฟ แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าสำหรับความหนาแน่นรวมของชิ้นงานไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยชิ้นงานสูตร 75P บ่มขึ้น มีค่าความหนาแน่นรวมมากที่สุดที่ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากมีการเกิดสารประกอบเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมาก ส่งผลทำให้ภายในโครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นที่ได้กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อที่ 4.3.1 และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานสูตร OP ที่มีการเติมทรายบดละเอียดเพียงอย่างเดียวกับชิ้นงานสูตร 100P ที่มีการเติมพิทเซอร์เพียงอย่างเดียว พบว่า

ความหนาแน่นไม่แตกต่างกันแสดงได้ถึงค่าความถ่วงจำเพาะของทรายบดละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับพิทเซอร์

จากที่รูป 4.16 แสดงการดูดซึมน้ำพบว่า ชี้นงานที่ทำการบ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยพิทเซอร์เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกากับอะลูมินาในพิทเซอร์กับพอร์ตแลนด์ไธมัทริกซ์ รวมถึงมีความชื้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดเฟสเชื่อมประสาน (C-S-H gel) ส่งผลให้ภายในโครงสร้างมีความหนาแน่นมากและมีรูพรุนน้อย ในขณะที่ชี้นงานที่บ่มด้วยออโตเคลฟมีแนวโน้มตรงกันข้าม เมื่อแทนที่ด้วยพิทเซอร์ในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำของชี้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น คาดว่าเกิดจากการมีไฮดรอกไซด์ค้างบนกระดาศฉลากทำปฏิกิริยากับพิทเซอร์ซึ่งอาจไปดึงความชื้นมาจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ทั้งรูพรุนในโครงสร้างในชี้นงาน

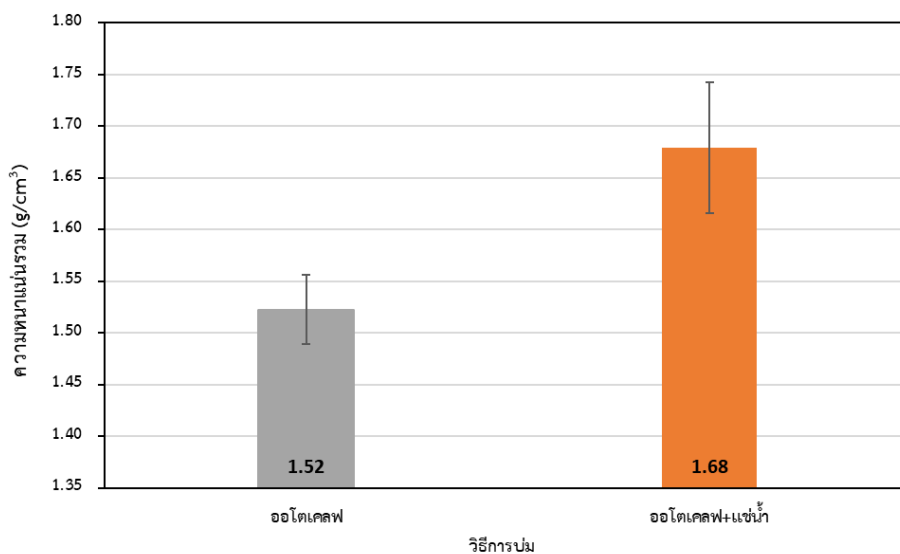


รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของชี้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาศฉลากและพิทเซอร์

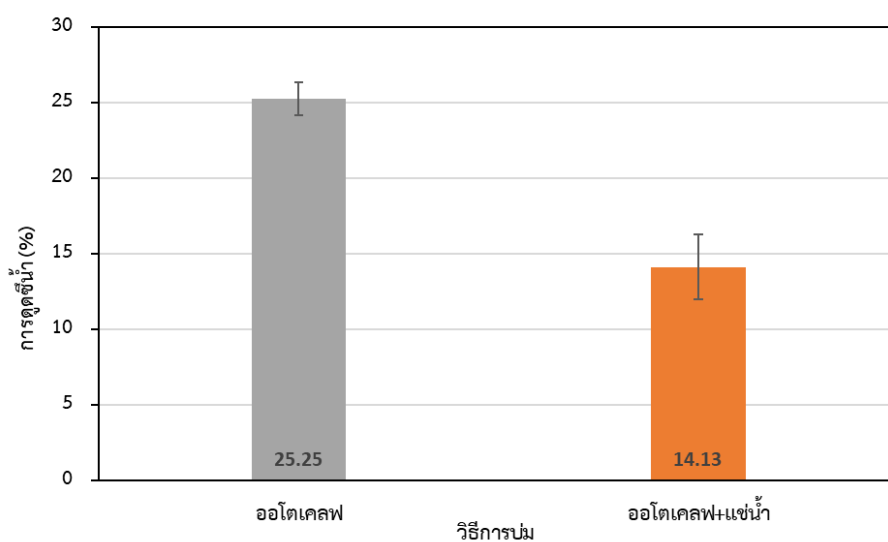


รูปที่ 4.16 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษฉลากและฟิซเซอร์

ความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากเหลือทิ้งและมีการแทนที่ด้วยฟิซเซอร์ร้อยละ 75 เปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำก่อนบ่มออโตเคลฟและชิ้นงานบ่มออโตเคลฟที่ไม่มีการแช่น้ำ แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วชิ้นงานที่มีการแช่น้ำก่อนนำไปบ่มออโตเคลฟมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำก่อนบ่มลดลงจากชิ้นงานที่ไม่ได้แช่น้ำคิดเป็นร้อยละ 44.04 ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้นทำให้ภายในโครงสร้างมีความหนาแน่นขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่แช่น้ำก่อนบ่มออโตเคลฟสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการแช่น้ำก่อนบ่มออโตเคลฟ



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่ฟิทเชอร์ร้อยละ 75 และมีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน



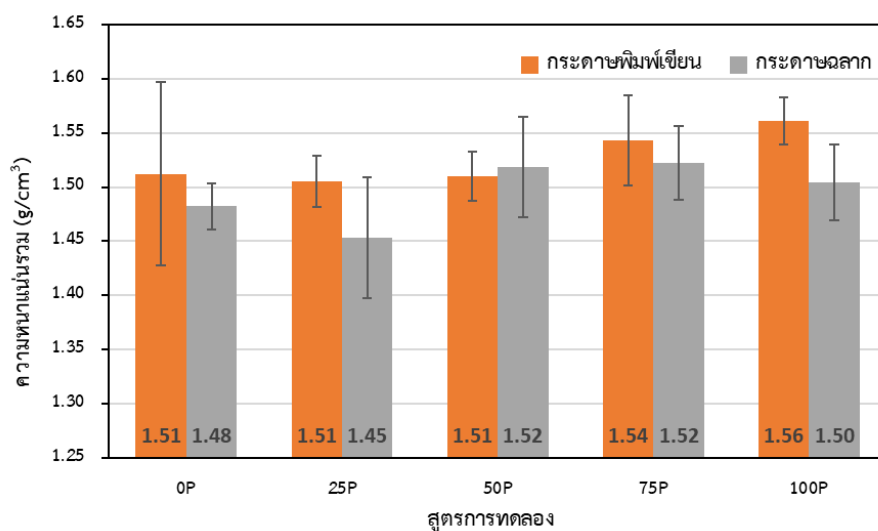
รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่ฟิทเชอร์ร้อยละ 75 และมีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน

4.4.2 การศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนและฟิทเชอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

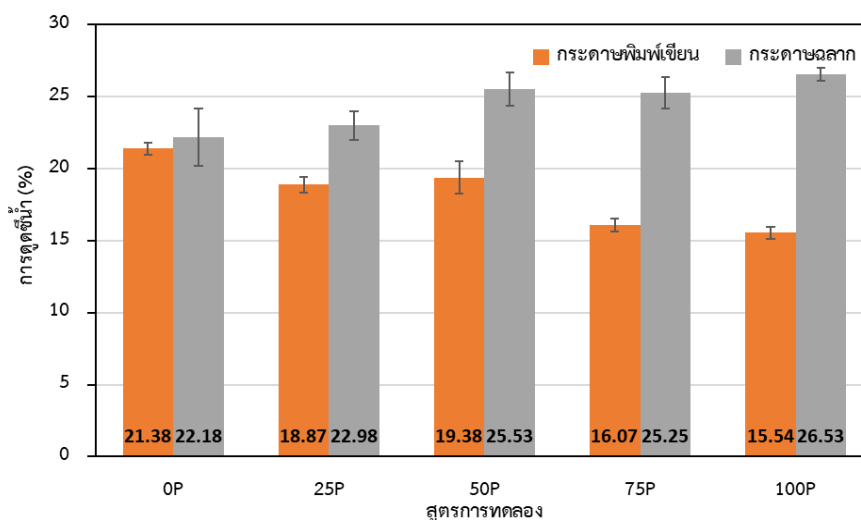
ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียนและฟิทเชอร์ภายใต้การบ่มด้วยออโตเคลฟเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลาก แสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าความหนาแน่นรวมไม่มีความแตกต่างกันซึ่งมีแนวโน้ม

ใกล้เคียงกับชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการใช้กระดาษฉลากเป็นส่วนผสมที่ได้กล่าวไปในหัวข้อข้างต้น คาดว่าเนื่องจากความหนาแน่นของเส้นใยกระดาษฉลากมีค่าใกล้เคียงกับเส้นใยกระดาษพิมพ์เขียนจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน

ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียนเปรียบเทียบกับกระดาษฉลากภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟที่มีความร้อนและความดันสูงชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียนมีค่าการดูดซึมน้ำลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยฟิทเซอร์ ซึ่งมีผลทดสอบคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากที่ผ่านการบ่มขึ้น ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าภายใต้สภาวะอโตเคลฟแคลเซียมออกไซด์ที่ติดค้างบนกระดาษฉลากส่งผลทำให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเปเปอร์กรีต



รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีการเติมกระดาษพิมพ์เขียนและฟิทเซอร์เปรียบเทียบกับการใช้กระดาษฉลาก ภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟ

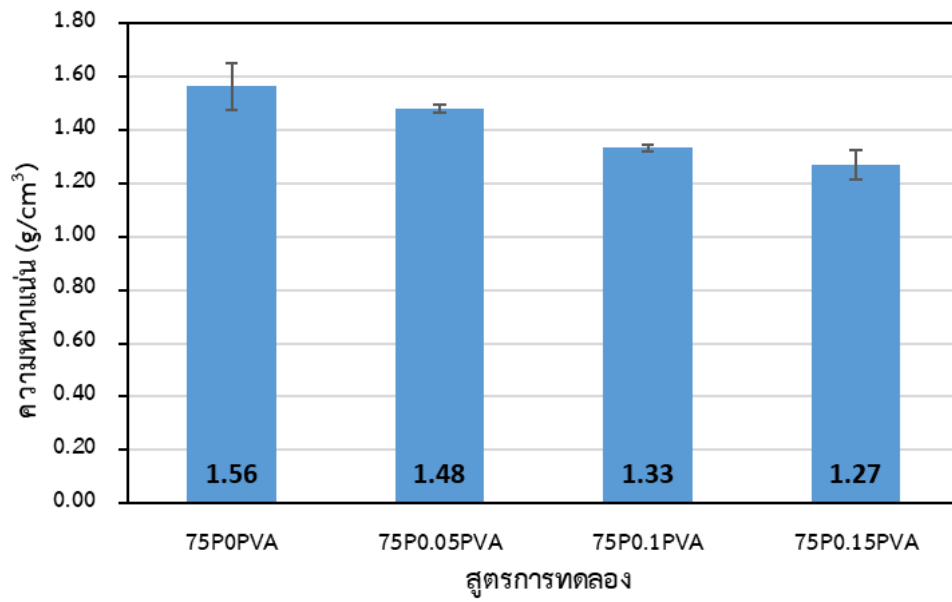


รูปที่ 4.20 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีการเติมกระดาศพิมเขียนและพิตเซอร์เปรียบเทียบกับการใช้กระดาศฉลาก ภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟ

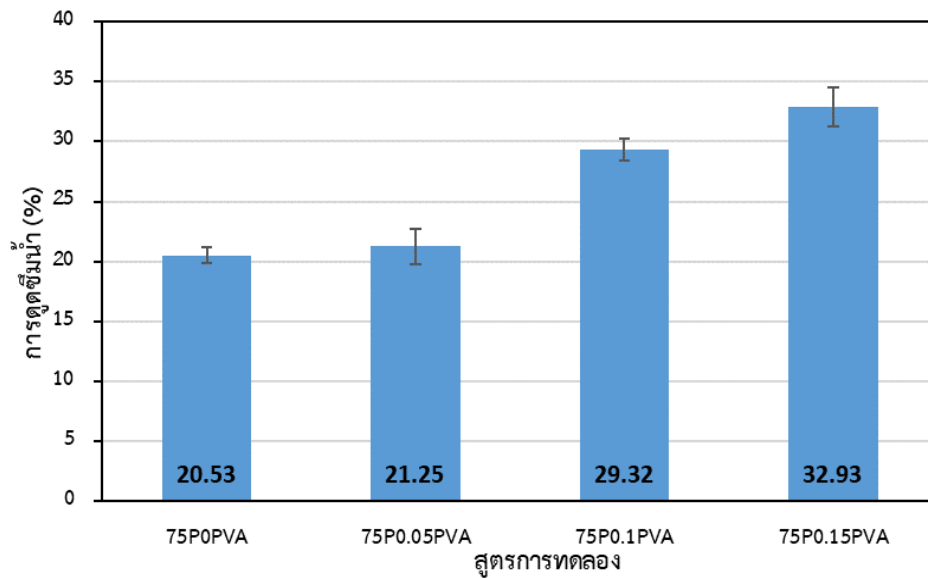
4.4.3 การศึกษาการใช้กระดาศฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพิตเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

จากรูปที่ 4.21 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีการใช้กระดาศฉลากเหลือทิ้ง ร่วมกับการใช้เส้นใย PVA ที่มีการแทนที่ปริมาณพิตเซอร์ร้อยละ 75 ของน้ำหนักทรายเป็นผลเฉลยพบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใย PVA ความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเส้นใย PVA มีความหนาแน่นต่ำกว่าปูนซีเมนต์และชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการใช้กระดาศฉลากเหลือทิ้งร่วมกับเส้นใย PVA ให้ค่าความหนาแน่นไม่ต่างกับชิ้นงานที่มีการใช้กระดาศฉลากเพียงอย่างเดียวซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐภัทร์และพศวัต (2021) [42]

ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแสดงในรูป 4.22 พบว่าการดูดซึมน้ำมีความสอดคล้องในทิศทางเดียวกันกับความหนาแน่น กล่าวคือชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีการดูดซึมน้ำสูง โดยค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 32.93 ซึ่งมากกว่าผลทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีการใช้กระดาศฉลากเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการเติมเส้นใยปริมาณมากขึ้นส่งผลให้เกิดการขัดกันของเส้นใยทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงภายในโครงสร้างจึงมีการดูดซึมน้ำที่สูง



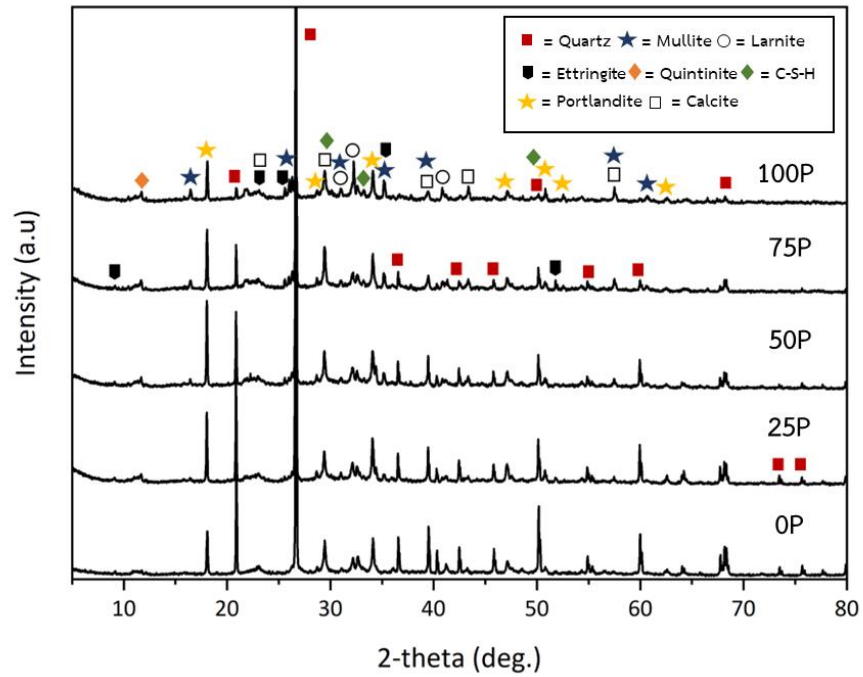
รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีการเติมกรดชาซอแลก เส้นใย PVA และพีทเซอร์ ภายใต้กระบวนการบ่มชิ้น



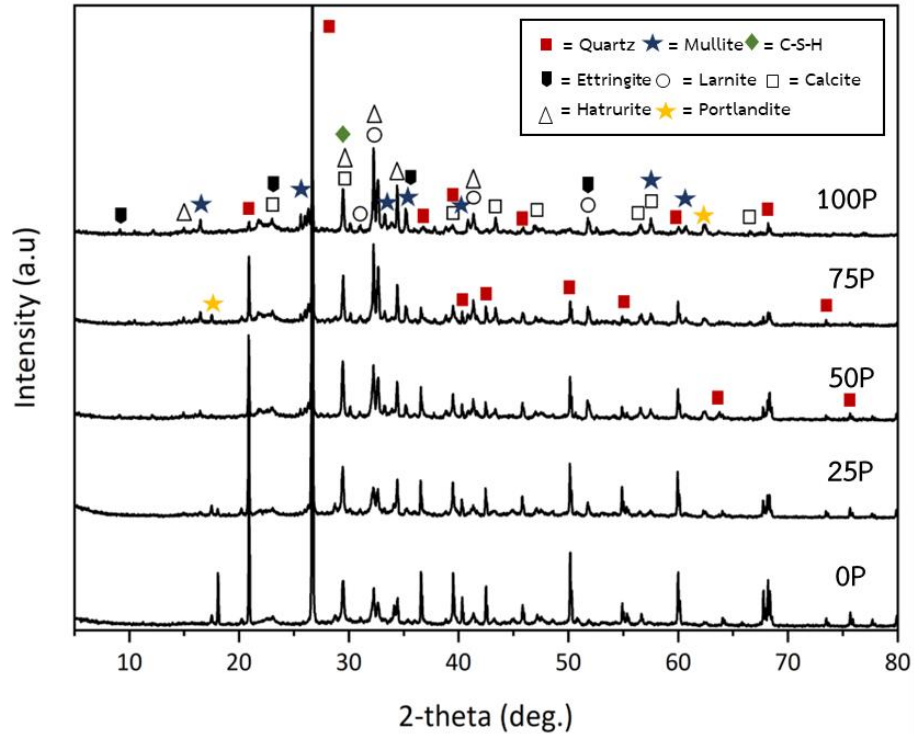
รูปที่ 4.22 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีการเติมกรดชาซอแลก เส้นใย PVA และพีทเซอร์ ภายใต้กระบวนการบ่มชิ้น

4.5 องค์ประกอบเฟส (Phase compositions)

จากรูปที่ 4.23 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD ของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและการแทนที่พิตเซอร์ในปริมาณต่างๆ ผ่านกระบวนการบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน พบว่าชิ้นงานที่มีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์จะพบเฟสควินไทไนต์ (Quintinite, $\text{Al}_2\text{Mg}_4(\text{OH})_{12}(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_3$) คาดว่ามาจากเฟสอินทรีย์ไคท์ที่มีในการเติมทัตคัมของพิตเซอร์ และพบเฟสพอร์ตแลนด์ (Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate hydrate, C-S-H) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะในคอนกรีตเกิดการฟอร์มตัวขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ รวมถึงพบเฟสแคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) จากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันของพอร์ตแลนด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกจากนี้ยังพบเฟสควอตซ์ (Quartz, SiO_2) และมุลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) จากการมีปริมาณของควอตซ์และมุลไลต์มากในพิตเซอร์ และพบเฟสเอทริงไคท์ (Ettringite) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของยิปซัมกับแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในซีเมนต์ และรูปที่ 4.24 แสดงผลการวิเคราะห์ของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยออโตเคลฟพบว่า มีเฟสของฮาทรูไรท์ (Hatrurite, C_3S) และเฟสลาร์ไนต์ (Larmitite, C_2S) ค่อนข้างมาก เกิดจากอนุภาคของซีเมนต์ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบ่มขึ้นและบ่มด้วยออโตเคลฟ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานสูตร 100P ที่มีการแทนที่ด้วยพิตเซอร์ทั้งหมดมีการพบเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นทำให้สามารถยืนยันการใช้พิตเซอร์เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์ได้



รูปที่ 4.23 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและพิทเซอร์ ภายใต้กระบวนการบ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและพิทเซอร์ ภายใต้กระบวนการบ่มด้วยอโตเคลฟ

4.6 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

4.6.1 การศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพิทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

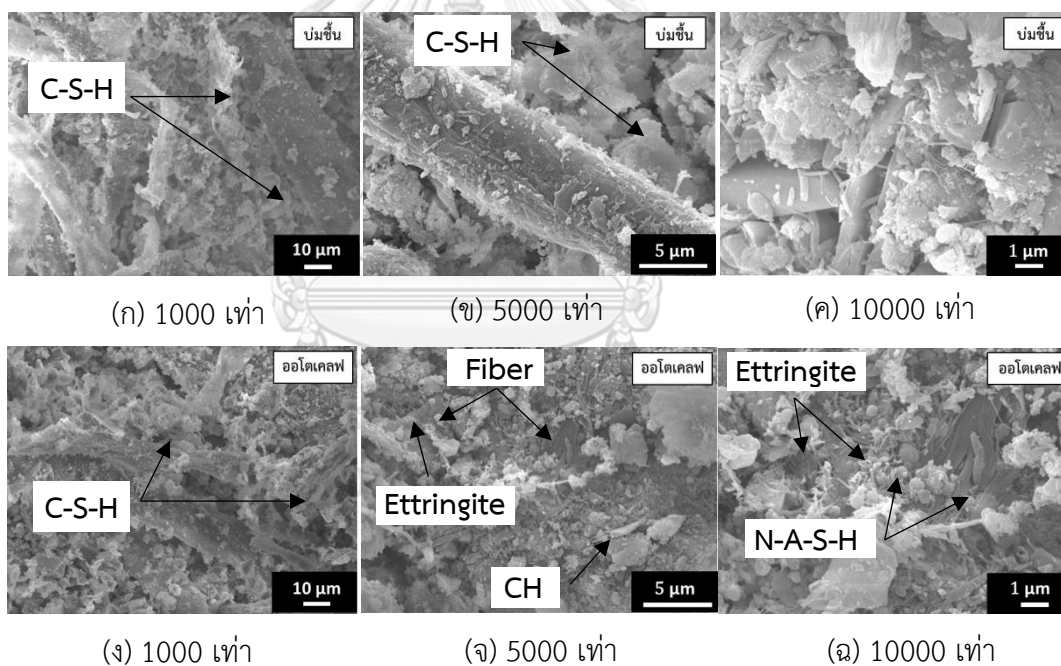
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ในปริมาณที่ต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000, 5000, และ 10000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.29

จากรูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตสูตร OP ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ พบว่ามีอนุภาคของซีเมนต์ ทราบดละเอียดและ C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นล้อมรอบและแทรกตามช่องว่างระหว่างเส้นใย โดยในรูปชิ้นงานที่บ่มด้วยอโตเคลฟพบโครงสร้างจุลภาคของผลึกเข็มเอททริงโกต์และผลึกพอร์ตแลนด์ (CH) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่น 6 เหลี่ยมได้อย่างชัดเจน โดยการเกิดเฟส C-S-H และ CH ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานหลักในคอนกรีตส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นและมีส่วนช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุ และจากภาพกำลังขยาย 10000 เท่าของชิ้นงานบ่มด้วยอโตเคลฟพบว่ามีเจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Sodium aluminosilicate hydrate, N-A-S-H) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมอสัณฐาน [51] กระจายอยู่เล็กน้อยในโครงสร้าง คาดว่ามาจากโซเดียมออกไซด์ในกระดาษฉลากทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาในพิทเซอร์ เนื่องจาก N-A-S-H เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแอลคาไลน์ในคอนกรีต (Alkali-activated concrete) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างแอลคาไลน์ (Na_2O , K_2O) และอะลูมิโนซิลิเกต (Al_2SiO_5) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเฟสเชื่อมประสานสามารถรับแรงได้เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการอยู่ร่วมกันของ N-A-S-H กับผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันส่งผลช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ [25, 52] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mavroulidou และ Shah (2021) [53] จากการใช้ซีเมนต์ก่อนจากกระดาษ (Paper sludge ash) เป็นตัวกระตุ้นแอลคาไลน์ในคอนกรีต

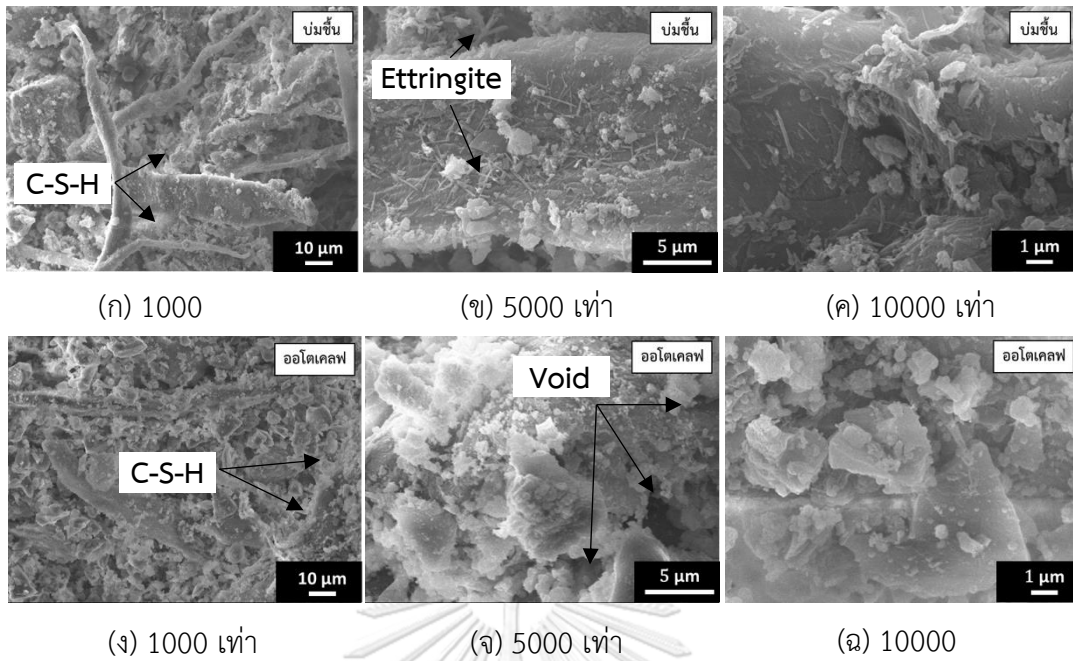
รูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 25 และ 50 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ส่งผลให้ชิ้นงานที่ทำการบ่มด้วยอโตเคลฟมีรูพรุนหรือช่องว่างเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำสูงในชิ้นงาน และสังเกตพบเฟส C-S-H และเอททริงโกต์ได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการบ่มขึ้น ในรูปที่ 4.26 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มขึ้นยังคงมี

การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันล้อมรอบเส้นใย และพบผลึกเอททริงโกต์ (แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต) บางส่วนมีการฟอร์มตัวบนเส้นใย และรูปที่ 4.27 สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการบ่มขึ้นจะพบ C-S-H เกิดขึ้นได้มาก และพบผลึกเอททริงโกต์มีการกระจายอยู่บนอนุภาคของแคลเซียมอะลูมิเนต

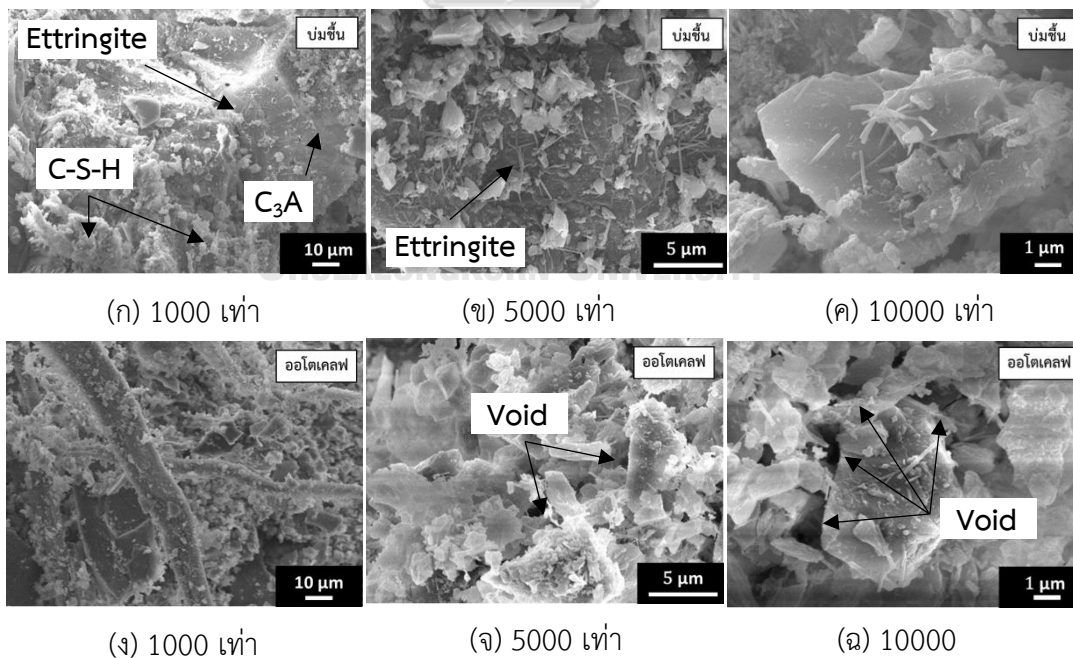
รูปที่ 4.28 และ รูปที่ 4.29 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีการแทนที่พืทเซอร์ร้อยละ 75 และ 100 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยพืทเซอร์จะสังเกตเห็น C-S-H เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นล้อมรอบเส้นใย สังเกตเห็นพอร์ตแลนด์ไดต์และเอททริงโกต์ที่เกิดขึ้นอยู่ร่วมกันภายในโครงสร้าง ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มอโตเคลฟพบการเกิด C-S-H ได้น้อยกว่าและมีการเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ รวมถึงยังคงพบรูพรุนได้มาก และพบเฟส N-A-S-H ได้อยู่บางส่วนภายในโครงสร้างของชิ้นงานเปเปอร์กรีต



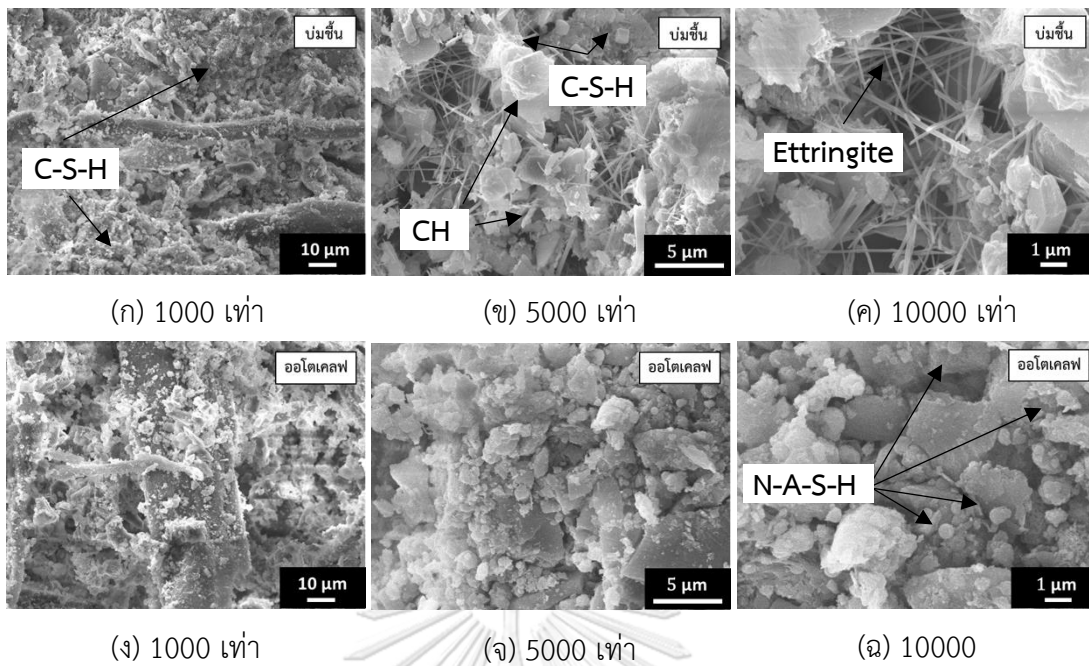
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและไม่มีการแทนที่ด้วยพืทเซอร์ (OP) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มขึ้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ



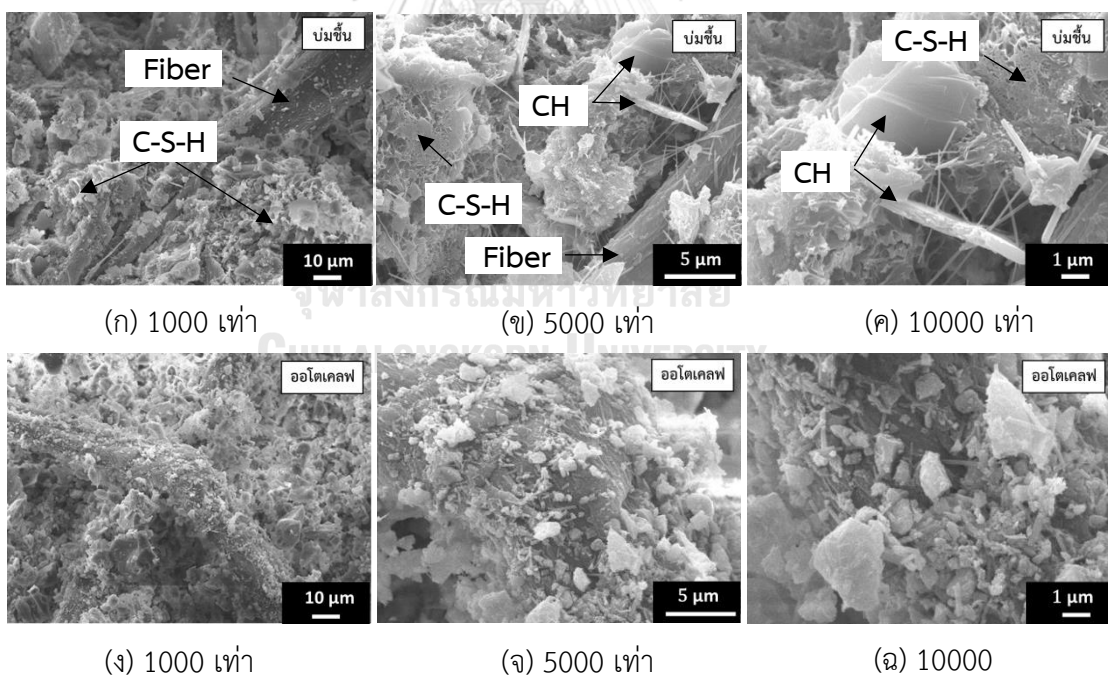
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 25 (25P) ผ่านการกระบวนกร (ก) – (ค) บ่มชื้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ



รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 50 (50P) ผ่านการกระบวนกร (ก) – (ค) บ่มชื้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ

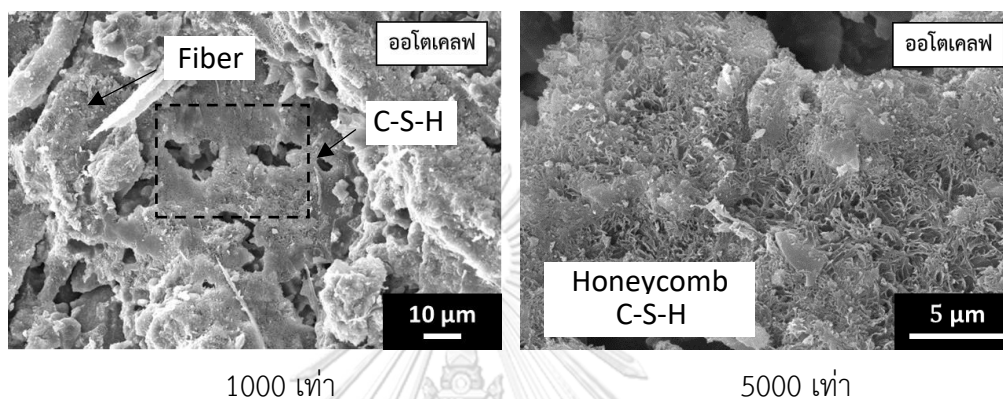


รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 75 (75P) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มชื้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ



รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ทั้งหมด (100P) ผ่านการกระบวนการ (ก) – (ค) บ่มชื้น และ (ง) – (ฉ) บ่มอโตเคลฟ

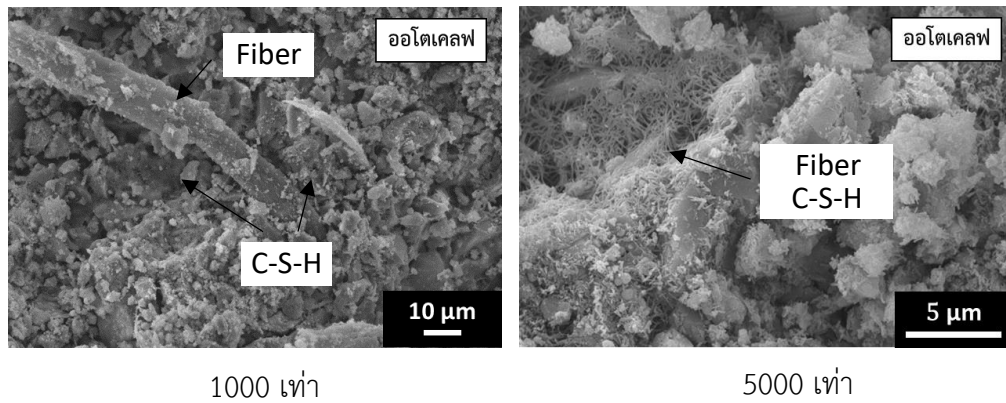
รูปที่ 4.30 แสดงชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 75 ที่ผ่านการนำไปแช่น้ำก่อนบ่มด้วยอโตเคลฟที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า พบว่าสังเกตเห็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนแต่ยังคงมีรูพรุนอยู่บ้างเล็กน้อย โดยรูปกำลังขยายที่ 5000 เท่า พบ C-S-H ซึ่งมีรูปร่างแบบรังผึ้ง (Honeycomb C-S-H) [54]



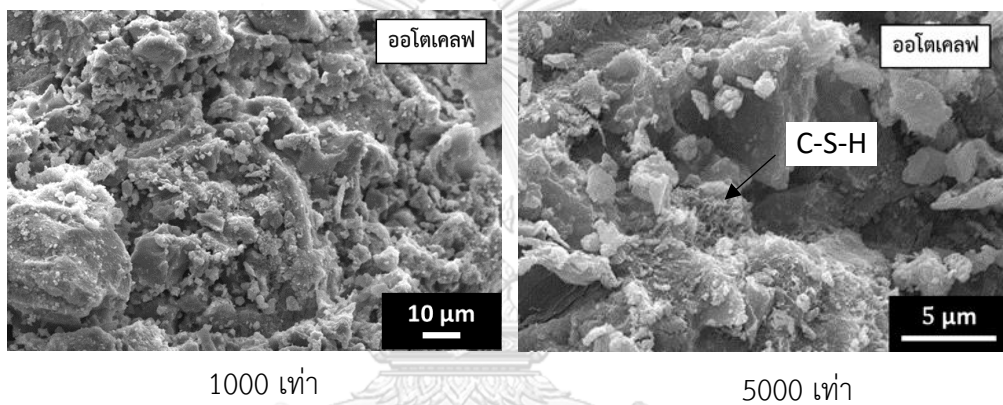
รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากและมีการแทนที่พิทเซอร์ร้อยละ 75 ผ่านการนำไปแช่น้ำก่อนบ่มอโตเคลฟ

4.6.2 การศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนและพิทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

รูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างเปเปอร์กรีตที่มีการใช้กระดาษพิมพ์เขียนแทนการใช้กระดาษฉลากภายใต้การบ่มด้วยอโตเคลฟ และเป็นตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ (OP.DA) และมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ (100P.DA) ตามลำดับที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า พบว่าตัวอย่างที่ใช้กระดาษพิมพ์เขียนเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่พิทเซอร์ยังคงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดย C-S-H เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นโดยมีลักษณะแบบเส้นใย [55] ขึ้นภายในโครงสร้างส่งผลทำให้มีโครงสร้างมีความหนาแน่น มีรูพรุนค่อนข้างน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบความแข็งแรงเชิงกายภาพ และกระดาษพิมพ์เขียนไม่มีองค์ประกอบของโซเดียมออกไซด์ในโครงสร้างจึงไม่พบเฟสของ N-A-S-H



รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียน และไม่มีการแทนที่ด้วยฟิซเซอร์ผ่านการบ่มด้วยออตเคลฟ

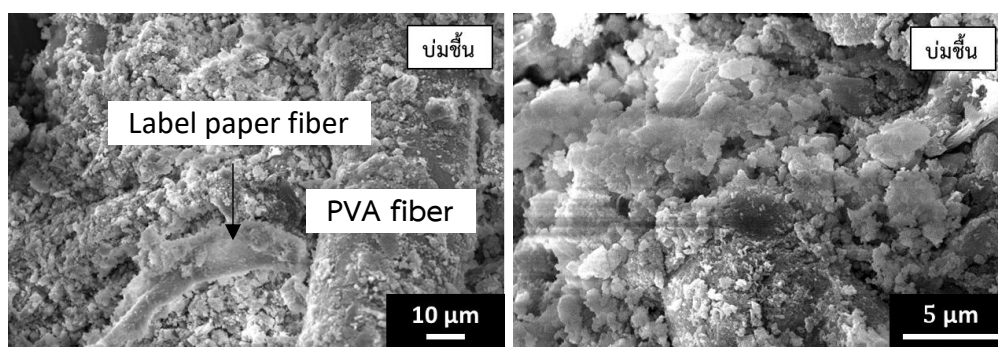


รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษพิมพ์เขียน และมีการแทนที่ด้วยฟิซเซอร์ทั้งหมดผ่านการบ่มด้วยออตเคลฟ

4.6.3 การศึกษาการใช้กระดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และฟิซเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากร่วมกับเส้นใย PVA และมีการแทนที่ด้วยฟิซเซอร์ร้อยละ 75 ภายใต้สภาวะบ่มชื้น แสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าเส้นใย PVA และเส้นใยจากกระดาษฉลากมีการจัดเรียงตัวกันแบบสุ่มและกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ โดยเส้นใย PVA มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยของกระดาษฉลาก และทั้งสองเส้นใยอยู่ร่วมกันโดยมีปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นรอบล้อมเส้นใย รวมถึงบางส่วนของฟิซเซอร์ที่ไม่เกิดการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมีส่วนช่วยในการเติมเต็มช่องว่างทำให้ภายในโครงสร้างของ

เมทริกซ์มีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลช่วยให้สามารถปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลในวัสดุซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ (2020) [56]



1000 เท่า

5000 เท่า

รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากร่วมกับเส้นใย PVA ร้อยละ 5 และมีการแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 75 ผ่านการบ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวัสดุเปเปอร์กรีตที่เตรียมจากกระดาษฉลากเหลือทิ้งและแทนที่ทรายบดละเอียดด้วยเซรามิกพิทเซอร์ในสัดส่วนร้อยละ 0-100 โดยน้ำหนัก โดยทำการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการบ่มขึ้นและบ่มอัดเคลฟ และศึกษาผลกระทบของเปเปอร์กรีตที่มีการใช้เส้นใย PVA เสริมแรงร่วมกับกระดาษฉลากเหลือทิ้ง โดยทำการศึกษาผลกระทบเชิงกายภาพ องค์ประกอบเฟส และโครงสร้างจุลภาค ได้ข้อสรุปดังนี้

1. สัดส่วนการเตรียมเปเปอร์กรีตที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากเหลือทิ้งและพิทเซอร์ที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ การใช้กระดาษฉลากร้อยละ 30 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และแทนที่ทรายบดละเอียดด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความดัน 25 เมกะพาสคัล ทิ้งให้เซตตัวหนึ่งวัน และนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 10 นาที ก่อนบ่มอัดเคลฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความต้านแรงดัดอยู่ที่ 10.32 เมกะพาสคัล ความหนาแน่นที่ 1.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 14.13

2. ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของกระดาษฉลากบ่มด้วยอัดเคลฟให้ผลในเชิงลบเนื่องจากโซเดียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับพิทเซอร์ทำให้ความชื้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้ไม่มีความชื้นเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จึงมีการทิ้งรูพรุนไว้ภายในโครงสร้าง

3. การใช้เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร่วมกับกระดาษฉลากช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกายภาพ โดยสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสัดส่วนร้อยละ 5 กระดาษฉลากร้อยละ 30 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และแทนที่ด้วยพิทเซอร์ร้อยละ 75 นำชิ้นงานบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน ช่วยเพิ่มระยะแอนของชิ้นงาน 5.34 เท่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีการใช้กระดาษฉลากเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเส้นใยเกิดการสานตัวกันจึงสามารถทำให้รับแรงได้มากขึ้น

4. ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่มีการแทนที่ทรายบดละเอียดด้วยพิทเซอร์ทั้งหมดมีการพบเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้สามารถยืนยันการใช้เซรามิกพิทเซอร์เป็นวัสดุปอซโซลานได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) ในปริมาณเหมาะสมเพื่อช่วยให้การอัดขึ้นรูปมีความสม่ำเสมอของชิ้นงาน
2. ศึกษาการทดลองโดยใช้กระดาษพิมพ์เขียนเป็นส่วนผสมในเปเปอร์กรีตโดยการนำไปแช่น้ำก่อนนำไปบ่มในอโตเคลฟ และเพิ่มอุณหภูมิการบ่ม
3. ใช้เทคนิครามาน (Raman spectroscopy) ในการตรวจสอบการเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน (CASH, CAH) ในชิ้นงานที่มีการแทนที่ด้วยฟิทธเซอร์



บรรณานุกรม

1. Shermale, Y., and Varma, M. 2015. Papercrete: An Efficient Use of Waste Paper. Recent Trends in Civil Engineering and Technology 5: 54-59.
2. Fuller, B., Fafitis, A., and Santamaria, J. 2006. The Paper Alternative. Civil Engineering Magazine Archive 76: 72-77.
3. Ghosh, A. K. 2018. A Review on Paper Crete: A Sustainable Building Material. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 05: 1499-1510.
4. Zaki, H., Gorgis, I., and Salih, S. 2018. Mechanical properties of papercrete. MATEC Web of Conferences 162: 02016.
5. Cardinale, T., D'Amato, M., Sulla, R., and Cardinale, N. 2021. Mechanical and Physical Characterization of Papercrete as New Eco-Friendly Construction Material. Applied Sciences 11: 1011
6. Al-Zubaidi, A. B., Azzat, S. R., and Al-Tabbakh, A. A. 2020. Recycling wastepaper papercrete to produce green concrete. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 870.
7. นันทชัย ชูศิลป์, จุฑามาศ ลักษณะกิจ, พรนารายณ์ บุญราศรี, และ จำรูญ สมบูรณ์. 2019. The Development of Tile Roof from Disposal Materials. Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal 11: 41-53.
8. Ashori, A., Tabarsa, T., and Valizadeh, I. 2011. Fiber reinforced cement boards made from recycled newsprint paper. Materials Science and Engineering: A 528: 7801-7804..
9. Hospodarova, V., Stevulova, N., Briancin, J., and Kostelanská, K. 2018. Investigation of Waste Paper Cellulosic Fibers Utilization into Cement Based Building Materials. Buildings 8: 43.
10. Afnan, A., Mohammad, A., Khalil, A., and Rahman, M. 2021. Mechanical properties and durability of boardcrete blocks prepared from recycled cardboard. Journal of Building Engineering 33: 101644.
11. Khorami, M., and Ganjian, E. 2013. The effect of limestone powder, silica fume

- and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. Construction and Building Materials 46: 142-149.
12. Bukhari, K., Dar, A. M. and Yousuf, M. 2016. A Study of Papercrete towards Building Sustainable & Resilient Infrastructure. i-manager's Journal on Structural Engineering 5: 27-31.
 13. ประวัติปูนซีเมนต์[online]. Available from: <https://www.cpacacademy.com> [2022, May 5].
 14. ปูนซีเมนต์[online]. Available from: <https://www.cpacacademy.com> [2022, May 5]
 15. กระบวนการผลิต[online]. Available from: <https://www.asiacement.co.th> [2022, May 5].
 16. Pahasuwanno, P. 2020. Recycling of Fiber Cement Waste as the Filler in High Performance Fiber - Reinforced Cement Composites. Master's thesis, Kasetsart university.
 17. ชนกฤต จันทรา, กฤษฎา ศรีสมพร, ศักดิ์ประยุทธ สิ้นธุภิญโญ, และ ศุภกร รักใหม่. 2014. การศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ด้วยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอกซ์. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย 2: 30-35.
 18. John, E., Matschei, T., and Stephan, D. 2018. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review. Cement and Concrete Research 113: 74-85.
 19. Barnes, P. and Bensted, J. 2002. Hydration of Portland cement. In Structure and Performance of Cements. 2nd ed. CRC Press.
 20. Peter, M. A., Muntean, A., Meier, S. A., and Böhm, M. 2008. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. Cement and Concrete Research 38(12): 1385-1393.
 21. Garcia, D. C.S., Wang, K., and Figueiredo, R. B. 2018. The influences of quartz content and water-to-binder ratio on the microstructure and hardness of autoclaved Portland cement pastes. Cement and Concrete Composites 91: 138-147.
 22. Zeyad, A. M., et.al. 2022. Review on effect of steam curing on behavior of concrete. Cleaner Materials 3: 100042.
 23. การบ่มคอนกรีต[online]. Available from: <https://www.cpacacademy.com> [2022,

June 26].

24. Pawar, Y., and Kate, S. R. 2020. Curing of Concrete: A Review. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 07: 1820-1824.
25. Carrasco, M. T. and Puertas, F. 2017. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: Alkali activated cements or geopolymers. Revista Ingenieria de Construccion 32: 5-12.
26. Palomo, A., et.al. 2014. Activación alcalina: Revisión y nuevas perspectivas de análisis. Materiales de Construcción 64: e022.
27. Marvila, M. T., Azevedo, A. R., and Vieira, C. M. 2021. Reaction mechanisms of alkali-activated materials. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais 14: e14309.
28. Suolution, W. P. Common label materials for craft beer labels[online]. Available from: <https://www.slideshare.net> [2022, June 26].
29. A Visual Guide to Beer Label Materials[online]. Available from: <https://matthatfieldart.com> [2022, June 26]
30. Suemkrathok, N. 2020. Preparation and characterization of previous concrete containing beverage industrial waste. Master's thesis, Chulalongkorn University.
31. นิยามและโครงสร้างของกระดาษ[online]. Available from: <https://packaging.oie.go.th> [2022, June26]
32. The structural chemical formula of the cellulose polymer[online]. Available from: <https://www.shutterstock.com> [2022, June 26]
33. Khemchaloem, V. and Janbang, A. 2019. The use of printing/writing and label paper wastes in papercrete composites. Chulalongkorn university.
34. อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. ปอซโซลาน(Pozzolan)[online]. Available from: <https://www.dss.go.th> [2022, May 17].
35. Mohammed, S. 2017. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. Construction and Building Materials 140: 10-19.
36. International, A. 2019. ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
37. Pitarch, A. M., et.al. 2021. Pozzolanic activity of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware in eco-friendly Portland blended cements. Journal of Cleaner Production

- 279: 123713.
38. Li, L., Liu, W., You, Q., Chen, M., and Zeng, Q. 2020. Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials. Journal of Cleaner Production 259: 120853.
 39. Reig, L., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., and Payá, J. 2021. Potential use of ceramic sanitary ware waste as pozzolanic material. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.
 40. Lavat, A. E., Trezza, M. A., and Poggi, M. 2009. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. Waste Management 29: 1666-1674.
 41. Awoyera, P. O., Olalusi, O. B., and Babagbale, D. P. 2021. Production of lightweight mortar using recycled waste papers and pulverized ceramics: Mechanical and microscale properties. Journal of Building Engineering 39: 102233.
 42. Khaimook, N. and Nimitchaikijkul, P. 2021. Improvement of mechanical properties of papercrete composites made from label-paper waste and polypropylene fiber. Chulalongkorn University.
 43. แคลเซียมคาร์บอเนต[online]. Available from: <https://thaipolychemicals.weebly.com> [2022, May 6].
 44. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2561. มอก. 1427-2540 แผ่นซีเมนต์เส้นใย: แผ่นเรียบ
 45. International, A. 2022. ASTM-C1186: Standard Specification for Flat Fiber-Cement Sheets
 46. สุรัชชัย อำนวยพรเลิศ, พงศ์พันธุ์ กาญจนการุญ, และ อนุวัฒน์เสมอเชื้อ. 2562. พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาดแทนที่มวลรวม. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต. 2: 157-180.
 47. Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J. A., Filho, R. D. 2011. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. Cement and Concrete Composites 33: 586-595.
 48. Pakravan, H. R., Jamshidi, M. and Latifi, M. 2016. Study on fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low- and high-modulus polymeric fibers. Construction and Building Materials 112: 739-746.

49. Sadrolodabae, P., Claramunt, J., Ardanuy, M. Fuente, A. 2021. Mechanical and durability characterization of a new textile waste micro-fiber reinforced cement composite for building applications. Case Studies in Construction Materials 14: e00492.
50. PVA Fibers[online]. Available from: <https://nycon.com/collections/pva-fibers> [2022, June 12].
51. García-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, A., and Fernández-Jiménez, A. 2012. Hybrid alkaline cements. Part I: Fundamentals. Revista Romana de Materiale/Romanian Journal of Materials 42: 330-335.
52. สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ, ธนากร ภูเงินขำ, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2556. สมบัติของ แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 2: 97-106.
53. Mavroulidou, M. and Shah, S. 2021. Alkali-activated slag concrete with paper industry waste. Waste Management & Research 39: 466-472.
54. Matolepszy, J. and Grabowska, E. 2015. Sulphate Attack Resistance of Cement with Zeolite Additive. Procedia Engineering 108: 170-176.
55. Demir, I. and Baspinar, M. S. 2008. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash–lime–gypsum mixture. Construction and Building Materials 22: 1299-1304.
56. Xu, H., et. al. 2020. Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. Construction and Building Materials 261: 120610.

ภาคผนวก

1. ผลการศึกษาการใช้กระดาษฉลากและพีทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

- 1.1 ความต้านแรงดัด แสดงในตารางที่ 1
- 1.2 ความหนาแน่นรวม และการดูดซึมน้ำ แสดงในตารางที่ 2
- 1.3 การดูดซึมน้ำ แสดงในตารางที่ 3
- 1.4 ความเหนียว แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระดาษฉลากและพีทเซอร์

สูตรการทดลอง	ความต้านแรงดัด (เมกะพาสคัล)		
	บ่มชื้น	บ่มอโตเคลฟ	บ่มอโตเคลฟ (แช่น้ำก่อนบ่ม)
0P	5.87 ± 0.53	6.30 ± 0.54	-
25P	5.79 ± 0.42	2.50 ± 0.58	-
50P	7.74 ± 0.56	1.77 ± 0.62	-
75P	8.63 ± 0.55	2.61 ± 0.55	10.32 ± 0.61
100P	7.83 ± 0.07	1.53 ± 0.22	-

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นรวมชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระดาษฉลากและพีทเซอร์

สูตรการทดลอง	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)		
	บ่มชื้น	บ่มอโตเคลฟ	บ่มอโตเคลฟ (แช่น้ำก่อนบ่ม)
0P	1.51 ± 0.04	1.48 ± 0.02	-
25P	1.44 ± 0.05	1.45 ± 0.06	-
50P	1.50 ± 0.03	1.52 ± 0.05	-
75P	1.56 ± 0.09	1.52 ± 0.03	1.68 ± 0.06
100P	1.53 ± 0.04	1.50 ± 0.04	-

ตารางที่ 3 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระดาษฉลากและฟิทเซอร์

สูตรการทดลอง	การดูดซึมน้ำ (%)		
	บ่มขึ้น	บ่มอโตเคลฟ	บ่มอโตเคลฟ (แช่น้ำก่อนบ่ม)
0P	22.62 ± 0.6	22.18 ± 1.9	-
25P	22.63 ± 1.9	22.63 ± 1.01	-
50P	20.23 ± 0.32	20.23 ± 1.15	-
75P	20.53 ± 0.63	20.53 ± 1.10	14.13 ± 2.17
100P	15.46 ± 0.92	15.46 ± 0.47	-

ตารางที่ 4 ความเหนียวของชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระดาษฉลากและฟิทเซอร์ผ่านการบ่มขึ้น 7 วัน

สูตรการทดลอง	ความเหนียว (kJ/m ³)
มอร์ตาร์	13.51
0P	31.73
25P	33.29
50P	46.46
75P	45.02
100P	42.82

2. ผลการศึกษาการใช้กระดาษพิมพ์เขียนและฟิทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

2.1 ความต้านแรงดัด แสดงในตารางที่ 5

2.2 ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมพิมพ์เขียนและฟิทเซอร์ภายใต้

กระบวนการบ่มอโตเคลฟ

สูตรการทดลอง	ความต้านแรงดัด (เมกะพาสคัล)
	บ่มอโตเคลฟ
0P.DA	6.02 ± 0.60
25P.DA	7.74 ± 1.08
50P.DA	8.47 ± 1.01
75P.DA	9.94 ± 0.96
100P.DA	9.49 ± 1.22

หมายเหตุ : DA = กระจาดาษพิมพ์เขียน

ตารางที่ 6 ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีส่วนผสมพิมพ์เขียนและพืทเซอร์ภายใต้กระบวนการบ่มอโตเคลฟ

สูตรการทดลอง	บ่มอโตเคลฟ	
	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (%)
25P.DA	1.51 ± 0.02	18.87 ± 0.54
50P.DA	1.51 ± 0.02	19.38 ± 1.10
75P.DA	1.54 ± 0.04	16.07 ± 0.43
100P.DA	1.56 ± 0.02	15.54 ± 0.41

3. ผลการศึกษาการใช้กระจาดาษฉลาก เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพืทเซอร์ในวัสดุเปเปอร์กรีต

3.1 ความต้านแรงดัด แสดงในตารางที่ 7

3.2 ความหนาแน่นรวม และการดูดซึมน้ำ แสดงในตารางที่ 8

3.3 ความเหนียว แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระจาดาษฉลากและพืทเซอร์ภายใต้กระบวนการบ่มขึ้น

สูตรการทดลอง	ความต้านแรงดัด (เมกะพาสคัล)
	บ่มขึ้น
75P0.05PVA	8.92 ± 0.43
75P0.1PVA	7.08 ± 0.12
75P0.15PVA	6.52 ± 0.45

ตารางที่ 8 ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระดาษชลากและพีทเซอร์ ภายใต้กระบวนการบ่มขึ้น

สูตรการทดลอง	บ่มขึ้น	
	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (%)
75P0.05PVA	1.56 ± 0.01	21.25 ± 1.50
75P0.1PVA	1.33 ± 0.01	29.32 ± 0.09
75P0.15PVA	1.27 ± 0.06	32.93 ± 1.63

ตารางที่ 9 ความเหนียวของชิ้นงานที่มีส่วนผสมกระดาษชลากและพีทเซอร์ภายใต้กระบวนการบ่มขึ้น

สูตรการทดลอง	ความเหนียว (kJ/m ³)
75P0.05PVA	184.78
75P0.1PVA	308.94
75P0.15PVA	371.30

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นภัสสร แสงศิริผล
วัน เดือน ปี เกิด	26 มกราคม 2541
สถานที่เกิด	จังหวัดสระบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	312 ม.6 ต.บ้านครัว อ.บ้านหมอ จ.สระบุรี 18270
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference 2022 (PACCON2022) ระหว่าง วันที่ 30 มิถุนายน - 1 กรกฎาคม 2565 และได้รับการตีพิมพ์ในรูปแบบ E- proceeding หัวข้อ "Properties of papercrete prepared from label paper waste and ceramic pitcher"