การเตรียมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติและขยะพลาสติก
สำหรับผลิตภัณฑ์แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์

โดย
นายชนินทร ภูศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติและขยะพลาสติกสำหรับผลิตภัณฑ์แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์

โดย
นายชนินทร ภูศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION AND PROPERTIES OF NATURAL FIBER/PLASTIC WASTE-REINFORCED CEMENT COMPOSITES FOR FIBER CEMENT BOARD PRODUCT

By

MR. Chanintorn PUSRI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2020
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การเตรียมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติและขยะพลาสติกสำหรับผลิตภัณฑ์แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์
โดย	ชนินทร ภูศรี
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดศิริ เหมศรี)

....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์มาณพ ปานะโปย)

....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เฆษะปะบุตร)

....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

61402225 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์, วัสดุซีเมนต์เชิงประกอบ, โฟมพอลิสไตรีน, เส้นใยมะพร้าว, โครงสร้างซีเมนต์แบบแซนด์วิช, การจัดการขยะ

นาย ชนินทร ภูศรี: การเตรียมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติและขยะพลาสติกสำหรับผลิตภัณฑ์แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่มีน้ำหนักเบาโดยการผสมด้วยขยะโฟมพอลิสไตรีน และเส้นใยมะพร้าว ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการจัดการขยะพลาสติก และขยะมูลฝอยจากการเกษตรกรรม การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณโฟมพอลิสไตรีน และเส้นใยมะพร้าว และผลของความยาวของเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ โดยผันแปรปริมาณขยะโฟมพอลิสไตรีน และเส้นใยมะพร้าว 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และผันแปรความยาวของเส้นใยมะพร้าว 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร หลังจากชิ้นงานผ่านการไฮเดรชั่นเป็นเวลา 28 วัน พบว่า ความต้านแรงดัดโค้ง การดูดซึมน้ำ และความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น สำหรับความยาวและปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ 3 เซนติเมตรที่ปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ การเพิ่มปริมาณขยะโฟมพอลิสไตรีนมีผลทำให้ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนลดลงอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามความต้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นปริมาณขยะโฟมพอลิสไตรีนที่เหมาะสมคือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ จึงได้นำสูตรผสมข้างต้นมาจัดเรียงเป็นโครงสร้างแซนด์วิชซึ่งแสดงให้เห็นถึงความต้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก และความหนาแน่นรวมที่ยอมรับได้สำหรับโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งสูตรที่เหมาะสมคือ วัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยมะพร้าวความยาว 3 เซนติเมตรที่ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผสมกับขยะโฟมพอลิสไตรีน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ที่ถูกประกบด้วยวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยมะพร้าวความยาว 3 เซนติเมตรที่ปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ จากผลการวิจัยพบว่าขยะโฟมพอลิสไตรีน และเส้นใยมะพร้าว สามารถใช้ทดแทนซีเมนต์และแร่ใยหินในการผลิตแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาไม่แพง น้ำหนักเบา และมีความแข็งแรง

61402225 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Keyword : Fiber cement board, Cement composite, Expanded polystyrene foam, Coconut fiber, Sandwich cement structure, Waste management

MR. CHANINTORN PUSRI : PREPARATION AND PROPERTIES OF NATURAL FIBER/PLASTIC WASTE-REINFORCED CEMENT COMPOSITES FOR FIBER CEMENT BOARD PRODUCT THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR MANOP PANAPOY

This research has developed lightweight cement composites by mixing with polystyrene (PS) foam waste and coconut fiber. This is one effective method for plastic and agricultural wastes management. The objectives of this study were to investigate the effect of the amount of PS foam waste and coconut fiber, and the length of coconut fiber on the physical, mechanical, and thermal properties of the cement composites. The PS foam waste and coconut fiber were added to the blended mix in varied percentages of 0, 1, 2, 3 and 4% by weight of cement and the varied lengths of coconut fiber were 1, 2, 3, and 4 cm. After 28 days of hydration, the results showed that the flexural strength, water absorption, and impact strength of composite material increased with increasing coconut fiber content. The optimum length and amount of coconut fibers in this research was 3 cm at 4% by weight of cement. Increasing the amount of PS foam waste resulted in obvious lower bulk density, water absorption, and thermal conductivity. However, the flexural strength and impact strength of the composite material decreased as the amount of PS foam waste increased. Therefore, the optimum amount of PS foam waste was 1% by weight of cement. The above blended mix was, therefore, arranged into sandwich structures. The results revealed the acceptable flexural strength, impact strength, and bulk density for a lightweight structure. The appropriate cement composite consisted of the mixing of 3% coconut fiber content by weight of cement and fiber length of 3 cm with 1% PS foam waste that was sandwiched by 4% coconut fiber content by weight of cement and fiber length of 3 cm. The obtained results showed that PS foam waste and coconut fiber can be used as a substitute for cement and asbestos in the production of fiber cement boards to provide an inexpensive, lightweight, and strong product.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์โดยได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ฝ่ายที่มีส่วนช่วยสนับสนุนและช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีซึ่งผู้วิจัยต้องขอกล่าวขอบพระคุณดังต่อไปนี้

ท่านแรกขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้ให้คำปรึกษาชี้แนะ และให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เฌษะปะบุตร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัยสำหรับคำแนะนำที่ดีและน่าสนใจเสมอมาตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดศิริ เหมศรี ประธานกรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร. อภิรัตน์ เลาห์บุตรี กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำมาปรับปรุงงานวิจัยให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบให้คำปรึกษาแนะนำสำหรับการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์นักเคมี และ นางสาวมารินทร์ เฌษะปะบุตร ศิษย์เก่าผู้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้านเทคนิคการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณคณะผู้วิจัยจากงานที่ถูกนำมาอ้างอิง และแหล่งอ้างอิงต่าง ๆ สำหรับข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมสั่งสอนคอยสนับสนุนด้านการศึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ชนินทร ภูศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ช

สารบัญ.....ซ

สารบัญตาราง.....ฐ

สารบัญรูป.....ฑ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....3

1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย.....3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปูนซีเมนต์.....5

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [8].....5

2.1.2 การผลิตปูนซีเมนต์ [9].....6

2.1.3 องค์ประกอบในปูนซีเมนต์.....7

2.1.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [15].....11

2.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) [12].....12

2.1.6 วัสดุปอซโลลาน (Pozzolan material).....15

2.1.7 การบ่มคอนกรีต (Concrete curing) [17].....15

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโฟม [18].....17

2.2.1 ลักษณะโฟมแบ่งออกตามลักษณะของเซลล์ 18
2.2.2 ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ 18
2.2.3 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation) 19
2.2.4 โฟมอีพีเอส [19, 20] 20
2.2.5 สมบัติของโฟมโดยทั่วไป 22
2.2.6 ประโยชน์และการใช้งานโฟมพลาสติก 22
2.2.7 อันตรายจากโฟมอีพีเอส [22] 23
2.3 เส้นใย (Fibers) [23, 24] 24
2.3.1 ประเภทของเส้นใย 24
2.3.2 สมบัติของเส้นใย 24
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมะพร้าว [25] 26
2.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะพร้าว 26
2.4.2 เส้นใยมะพร้าว 27
2.4.2.1 ส่วนประกอบเส้นใยมะพร้าว 29
2.4.2.2 ประโยชน์ของเส้นใยมะพร้าว [33] 32
2.5 การพัฒนาซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ 32
2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ 32
2.5.2 ข้อดีของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ 33
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 40
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 40
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ 40
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 40
3.4 แนวคิดของการวิจัย 41

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 41
3.6 การเตรียมและวิเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 41
3.6.1 การพิจารณาองค์ประกอบสารเคมีและปริมาณของเส้นใยมะพร้าวด้วยมาตรฐานการทดสอบ Technical association of pulp and paper industry (TAPPI test method) 42
3.6.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ... 46
3.7 การขึ้นรูปซีเมนต์คอมโพสิต 47
3.7.1 ตอนที่ 1 การศึกษาผลของขนาด และปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติของซีเมนต์คอมโพสิต 47
3.7.2 ตอนที่ 2 การศึกษาผลของปริมาณขยะโฟมที่มีต่อสมบัติวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต 51
3.7.3 ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต 52
3.7.4 ตอนที่ 4 ศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 54
3.8 การทดสอบและวิเคราะห์ 55
3.8.1 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) 55
3.8.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) 57
3.8.3 การศึกษาสมบัติการต้านทานการติดไฟ 58
3.8.4 การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา 59
3.8.5 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk density) 59
3.8.6 การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ (Water absorption) 60
3.8.7 การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน (Thermal conductivity and thermal resistance) 60
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 62
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ 62
4.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใย 62

4.1.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว 63
4.1.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของขยะโฟม 64
4.1.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟม 66
4.2 การศึกษาผลของขนาด และปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติของซีเมนต์คอมโพสิต .. 68
4.2.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว 68
4.2.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว 69
4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว 73
4.2.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว 74
4.3 การศึกษาผลของปริมาณโฟมที่มีต่อสมบัติวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต 76
4.3.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม. 76
4.3.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม 77
4.3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม.... 80
4.4 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต 82
4.4.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว 82
4.4.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว 84
4.4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว 87
4.4.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว 89
4.5 การศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 91

4.5.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 92

4.5.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 93

4.5.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น (Bulk density) ของโครงสร้างแซนด์วิชปูนซีเมนต์ คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 95

4.5.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 96

4.6 การศึกษาสมบัติการต้านทานการติดไฟ 97

4.7 ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน (Thermal conductivity and thermal resistance) 103

4.8 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับงานวิจัยอื่น ๆ 106

4.9 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับทางการค้า 107

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 109

5.1 สรุปผลการวิจัย 109

5.2 ข้อเสนอแนะ 110

ภาคผนวก ก การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยซอฟต์แวร์ Image J 111

ภาคผนวก ข ค่าสมบัติเชิงกลของซีเมนต์คอมโพสิต 112

ภาคผนวก ค Proceeding งานประชุมวิชาการที่ได้เข้าร่วม 118

รายการอ้างอิง 124

ประวัติผู้เขียน 133

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [10] 7
ตารางที่ 2 สารประกอบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [11] 8
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1 [14]........... 11
ตารางที่ 4 ค่าการนำความร้อนของแก๊สชนิดต่างๆที่ใช้เป็นสารฟูที่ 20 องศาเซลเซียส [21]............. 22
ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว [28, 29] 28
ตารางที่ 6 สมบัติของเส้นใยมะพร้าว [32] 31
ตารางที่ 7 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าว 48
ตารางที่ 8 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์กับขยะโฟม 51
ตารางที่ 9 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 53
ตารางที่ 10 สูตรโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว......................... 54
ตารางที่ 11 อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ. 58
ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของสารในเส้นใยมะพร้าว... 64
ตารางที่ 13 ค่า T_{onset}, T_{endset} และ T_d ของเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟม EPS................................ 67
ตารางที่ 14 ค่าสมบัติเชิงกลของซีเมนต์คอมโพสิต... 90
ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน 103
ตารางที่ 16 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับงานวิจัยอื่น ๆ 106
ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับทางการค้า... 107

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 ลักษณะของไตรแคลเซียมซิลิเกต C_3S ซึ่งเป็นรูปหกเหลี่ยม และไดแคลเซียมซิลิเกต C_2S เป็นเม็ดกลมดำ [12] 9

รูปที่ 2 การพัฒนากำลังอัดของ C_3S, C_2S, C_3A และC_4AF [13] 10

รูปที่ 3 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซิลิเกต [12] 13

รูปที่ 4 ผลของการบ่มต่อกำลังอัด [17] 16

รูปที่ 5 ผลของการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำที่ความดันต่ำต่อกำลังของคอนกรีต [17] 17

รูปที่ 6 สัณฐานโครงสร้างของโฟม ก) เซลล์เปิด ข) เซลล์ปิด [18] 18

รูปที่ 7 กระบวนการ Extrusion foaming process [20] 21

รูปที่ 8 ตัวอย่างการขึ้นรูปโฟมด้วยเม็ดโฟม [20] 21

รูปที่ 9 ภาพตัดขวางของเส้นใยแต่ละชนิด [23] 25

รูปที่ 10 ภาพถ่ายต้นมะพร้าว [26] 26

รูปที่ 11 ส่วนประกอบของลูกมะพร้าว [25] 27

รูปที่ 12 เส้นใยมะพร้าว [27] 28

รูปที่ 13 เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบภายในผนังเซลล์ [30] 29

รูปที่ 14 โครงสร้างของเซลลูโลส [31] 29

รูปที่ 15 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสโดยทั่วไป [28] 30

รูปที่ 16 โครงสร้างของลิกนิน [30] 31

รูปที่ 17 Compressive strength ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์และเส้นใยมะพร้าวที่เวลาบ่ม 5, 7, 14, 28 และ 56 วัน [37] 35

รูปที่ 18 Flexural strength ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์และเส้นใยมะพร้าวที่เวลาบ่ม 7 และ 28 วัน [37] 36

รูปที่ 19 Compressive strength ที่เวลาบ่ม 28 วันของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์กับโฟมขนาด 3 และ 5 มิลลิเมตร [38] 36

รูปที่ 20 Compressive strength ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 % โดยน้ำหนักที่เวลาบ่ม 28 วัน [39] 37

รูปที่ 21 Modulus of rupture ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 0, 3, 6, 9, 12 และ15 % โดยน้ำหนัก ที่เวลาบ่ม 28 วัน [39] 37

รูปที่ 22 ค่า Thermal conductivity และปริมาณ EPS ในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต [42] 39

รูปที่ 23 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว 41

รูปที่ 24 ขยะโฟม EPS 42

รูปที่ 25 เครื่อง Scanning electron microscope (Hitachi TM3030) 46

รูปที่ 26 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (Mettler toledo) 46

รูปที่ 27 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในงานวิจัย 47

รูปที่ 28 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของขนาด และปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ 49

รูปที่ 29 การผสมสารตัวอย่าง (ซีเมนต์, น้ำ, เส้นใยมะพร้าวหรือขยะโฟม) โดยกวนให้เข้ากันในบีกเกอร์เป็นเวลา 5 นาที 49

รูปที่ 30 การนำสารผสมในรูปที่ 29 มาเทลงในแม่พิมพ์ขนาด 5 x 12 x 0.5 cm^3 50

รูปที่ 31 ทำการถอดชิ้นงานตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์จะได้ชิ้นงานที่มีขนาด 5 x 12 x 0.5 cm^3 50

รูปที่ 32 นำชิ้นงานตัวอย่างจากรูปที่ 31 มาจุ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อทำการบ่ม 50

รูปที่ 33 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วันสำหรับการศึกษาผลของขนาดและปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่ส่งผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต 51

รูปที่ 34 ขั้นตอนการศึกษาผลของขนาด และปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่ส่งผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต 52

รูปที่ 35 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน สำหรับการศึกษาผลของปริมาณขยะโฟมที่ส่งผลต่อสมบัติวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต 52

รูปที่ 36 การผสมปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวมีผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต 53

รูปที่ 37 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน สำหรับการศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวมีผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต 54
รูปที่ 38 ขั้นตอนศึกษาผลของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวต่อสมบัติของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต 55
รูปที่ 39 ตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมแบบโครงสร้างแซนด์วิช 55
รูปที่ 40 เครื่อง Universal testing machine รุ่น Instron 5965 56
รูปที่ 41 การทดสอบ Flexural แบบ 3 point bending test ของซีเมนต์คอมโพสิต 56
รูปที่ 42 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการทดสอบ Flexural (M34) 57
รูปที่ 43 เครื่อง Instron ceast 9050 impact pendulum machine 57
รูปที่ 44 การวางชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 58
รูปที่ 45 การทดสอบ Limited oxygen index 59
รูปที่ 46 เครื่อง Density kit (Mettler toledo) 59
รูปที่ 47 ตัวอย่างชิ้นงานการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน 60
รูปที่ 48 เครื่อง Thermal conductivity tester รุ่น ZNCLBS1128 61
รูปที่ 49 ภาพถ่ายเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในการทดลอง 62
รูปที่ 50 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใย 63
รูปที่ 51 ภาพถ่าย SEM ของขยะโฟม 65
รูปที่ 52 เทอร์โมแกรม TG และ DTG ของเส้นใยมะพร้าวภายใต้สภาวะอากาศที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที 66
รูปที่ 53 เทอร์โมแกรม TG และ DTG ของขยะโฟม EPS ภายใต้สภาวะอากาศที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที 66
รูปที่ 54 กราฟแสดงค่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ 68
รูปที่ 55 กราฟแสดงค่า Impact strength ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ 69

รูปที่ 56 ภาพถ่าย SEM ของซีเมนต์หลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก 71

รูปที่ 57 ภาพถ่าย SEM ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก 72

รูปที่ 58 กราฟแสดงค่า Bulk density ของของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ 73

รูปที่ 59 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณต่าง ๆ เป็นเวลา 120 นาที 75

รูปที่ 60 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาด และปริมาณต่างๆ เป็นเวลา 7 วัน 75

รูปที่ 61 กราฟแสดงค่า Flexural strength ของแผ่นซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ 76

รูปที่ 62 กราฟแสดงค่า Impact strength ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ 77

รูปที่ 63 ภาพ SEM ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมหลังการทดสอบการรับแรงกระแทก 79

รูปที่ 64 กราฟแสดงค่า Bulk density ของซีเมนต์คอมโพสิตผสมขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ 80

รูปที่ 65 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ 81

รูปที่ 66 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Flexural strength 83

รูปที่ 67 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 4 เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Flexural strength 83

รูปที่ 68 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3 เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Impact strength 84

รูปที่ 69 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 4 เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Impact strength 84

รูปที่ 70 ภาพ SEM ของซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าว และขยะโฟมหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก (a)-(b) M33F1, (c)-(f) M31F3 86

รูปที่ 71 กราฟแสดงผลการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3 เซนติเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อค่า Bulk density 87

รูปที่ 72 กราฟแสดงผลการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 4 เซนติเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อค่า Bulk density 88

รูปที่ 73 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ 89

รูปที่ 74 กราฟแสดงค่า Flexural strength ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 92

รูปที่ 75 กราฟแสดงค่า Impact strength ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 93

รูปที่ 76 ภาพ SEM ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก (a)-(b) M34(M33F1)M34, (c)-(d) M34(F1)M34 94

รูปที่ 77 กราฟแสดงค่า Bulk density ของโครงสร้างแซนด์วิชปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 95

รูปที่ 78 ผลการดูดซึมน้ำของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว 96

รูปที่ 79 ชิ้นงานสูตร Cement ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) 97

รูปที่ 80 ชิ้นงานสูตร Cement หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 % 97

รูปที่ 81 ชิ้นงานสูตร M34 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) 98

รูปที่ 82 ชิ้นงานสูตร M34 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 - 100 % 98

รูปที่ 83 ชิ้นงานสูตร F1 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) 99

รูปที่ 84 ชิ้นงานสูตร F1 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 - 100 % 99

รูปที่ 85 ชิ้นงานสูตร M33F1 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) 100

รูปที่ 86 ชิ้นงานสูตร M33F1 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 % 100

รูปที่ 87 ชิ้นงานสูตร M34(F1)M34 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) 101

รูปที่ 88 ชิ้นงานสูตร M34(F1)M34 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 % 101

รูปที่ 89 ชิ้นงานสูตร M34(M33F1)M34 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) 102

รูปที่ 90 ชิ้นงานสูตร M34(M33F1)M34 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 % 102

รูปที่ 91 ค่า Thermal conductivity ของซีเมนต์คอมโพสิต 104

รูปที่ 92 ค่า Thermal resistance ของซีเมนต์คอมโพสิต........ 104

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปูนซีเมนต์นั้นเป็นวัตถุดิบหลักสำคัญในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง วัสดุโครงสร้างของอาคาร สะพาน เสาอาคารทั่วไป ผนัง รั้ว พื้นคอนกรีต โดยปกติวัสดุก่อสร้างจากซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีค่าหน่วยน้ำหนักที่สูง เมื่อนำมาใช้ในงานก่อสร้างส่งผลให้มีน้ำหนักมากยากต่อการขนย้าย จึงมีแนวคิดที่จะลดน้ำหนักของซีเมนต์ลงโดยทำให้เป็นคอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete) โดยการใช้มวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete) เช่น ผงไม้ ผสมซีเมนต์แทนที่มวลหนัก เช่น ทราย หิน ผลิตเป็นแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์หรือซีเมนต์บอร์ด (Cement board) ทำเป็นแผ่นฝ้าเพดาน ผนังบ้าน หลังคา

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเปราะที่มีความแข็งแรงในด้านการบีบอัด แต่มีความอ่อนแอต่อแรงเฉือนและแรงดัดโค้ง [1] ดังนั้นความจำเป็นในการใช้วัสดุประกอบอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติเหล่านั้น โดยในปัจจุบันแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่พบมากที่สุดคือซีเมนต์ผสมแร่ใยหิน (Asbestos) จุดสนใจสำคัญของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ผสมแร่ใยหินสำหรับผู้ใช้คือความทนทาน และคุ้มค่า แต่อย่างไรก็ตามหากสูดดมหรือได้รับแร่ใยหินเข้าไปในร่างกายเป็นจำนวนมากนั้นจะเป็นสารก่อมะเร็งได้ [2] อีกวิธีที่น่าสนใจนี้ซึ่งปลอดภัยต่อสุขภาพคือการใช้เส้นใยอินทรีย์หรืออนินทรีย์แทนแร่ใยหิน [3]

การเติบโตอย่างรวดเร็วของเศรฐกิจ การขยายตัวของเมืองและอุตสาหกรรมก่อให้เกิดขยะอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมจำนวนมากโดยเฉพาะมะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ 2561 ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตมะพร้าวอันดับ 9 ของโลกซึ่งกะทิเป็นสินค้าส่งออกของไทยร้อยละ 75 ของสัดส่วนการส่งออกผลิตภัณฑ์มะพร้าวทั้งหมด [4] โดยแหล่งผลิตหลักอยู่ในภาคกลาง และภาคใต้ เช่น ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร ราชบุรี เป็นต้น ในการใช้ประโยชน์หลักของมะพร้าวจะใช้เนื้อมะพร้าว และน้ำมะพร้าวหลังจากการแปรรูปเป็นอาหารจะเหลือส่วนทีเป็นกาบมะพร้าวซึ่งเป็นของเสียส่วนใหญ่ โดยของเสียเหล่านี้จะเป็นแหล่งเพาะเชื้อโรค และที่อยู่ของแมลงต่าง ๆ ซึ่งในการลดของเสียเหล่านี้โดยการแยกเส้นใยมะพร้าวออกจากกาบมะพร้าวเพื่อใช้ประโยชน์ ส่วนที่เป็นเส้นใยมะพร้าวจะมีองค์ประกอบทางเคมีคือ เซลลูโลส และลิกนิน ทำให้เส้นใยมะพร้าวมีความแข็งแรง

เหนียว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีน้ำหนักที่เบาสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์บอร์ดซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้

โฟมอีพีเอส (Expandable polystyrene foam (EPS)) นั้นผลิตโดยกระบวนการสังเคราะห์ของพอลิสไตรีน (Polystyrene) ระหว่างกระบวนการมีการใส่สารฟู (Blowing agent) ทำให้พอลิสไตรีนนั้นขยายตัวแล้วมีอากาศเข้ามาแทนที่ซึ่งอากาศในโครงสร้างของโฟม EPS นั้นทำให้โฟมมีน้ำหนักที่เบา และเป็นฉนวนทางความร้อน สำหรับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้ EPS เป็นวัสดุฉนวนหรือบรรจุภัณฑ์ ใส่อาหาร วัสดุกันกระแทกเครื่องใช้ไฟฟ้าระหว่างการขนส่ง ลังใส่น้ำแข็ง ซึ่งจะเห็นว่าโฟม EPS ถูกใช้ประโยชน์เพียงระยะเวลาสั้นๆ ทำให้เกิดขยะโฟมขึ้นจำนวนมาก ขนส่งไปกำจัดได้ยากเนื่องจากโฟม EPS นั้นมีน้ำหนักเบาและมีปริมาตรสูง ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมาเนื่องจากโฟมนั้นกำจัดได้ยากไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ หากนำไปฝังกลบต้องใช้พื้นที่มากและก่อให้เกิดสารพิษตกค้าง ปนเปื้อนแหล่งน้ำ หากเผาทำลายก็ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ ปัญหาฝุ่นละออง และเกิดปัญหาโลกร้อน จากการศึกษาก่อนหน้านี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำโฟม EPS ไปใช้เป็น Geofoam สำหรับงานด้านธรณีวิทยาเพื่อช่วยลดการฝังกลบโฟมเหล่านี้ [4]

จากแนวคิดเรื่องระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) ในการรีไซเคิล และกระบวนการจัดการของเสียเป็นวิธีการเพื่อแก้ไขปัญหาในเรื่องนี้ซึ่งจะคำนึงถึงการใช้ประโยชน์จากของเสียทางอุตสาหกรรม และการเกษตรในการพัฒนาแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ชนิดใหม่ ซึ่งมีนักวิจัยหลายคนแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ และข้อดีหลายประการในการใช้เส้นใยธรรมชาติในการผลิตแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ เช่น เพิ่มค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength), ความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength), และลดค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) [5, 6] และการนำ EPS โฟมนั้นกลับมาแปรใช้ใหม่ในการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ โดยโฟมนั้นมีน้ำหนักเบา สามารถดูดซับเสียงได้ดี สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี และมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ [7] และมีความเป็นฉนวนทางความร้อน ในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกนั้นให้ความสำคัญกับปัญหาสิ่งแวดล้อมจึงมีแนวคิดเกี่ยวกับ Green concrete ซึ่งเป็นการใช้วัตถุดิบบางส่วนจากวัสดุรีไซเคิล (Recycled materials) หรือขยะ หรือการนำวัสดุจากธรรมชาติมาผสมในคอนกรีตเพื่อเพิ่มสมบัติให้แก่คอนกรีต และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะรวมทั้งช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้อีกด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เตรียมจากขยะโฟมพอลิสไตรีน (Waste expanded polystyrene foam) เส้นใยมะพร้าว และปูนซีเมนต์ที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกได้สูง การศึกษาอิทธิพลของโฟม EPS จากวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์และเส้นใยมะพร้าวเพื่อทดแทนซีเมนต์และแร่ใยหิน

ที่มีปริมาณแตกต่างกันของโฟม EPS และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาวเส้นใยต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวมาเป็นส่วนผสมในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตสำหรับผลิตภัณฑ์แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตที่เตรียมจากขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

1.2.3 เพื่อตรวจสอบสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตที่เตรียมจากขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดดังนี้

1.3.1 ใช้ขยะโฟมจาก Waste expanded polystyrene foam ที่เป็นโฟมกันกระแทกระหว่างการขนส่งสินค้า

1.3.2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

1.3.3 ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เส้นใยมะพร้าว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมแผ่นซีเมนต์คอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบาจากขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าวได้

1.4.2 สามารถลดปริมาณขยะโฟม และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้

1.4.3 สามารถเตรียมแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และน้ำหนักเบาสามารถแข่งขันกับแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีขายตามท้องตลาดได้

1.4.4 เพื่อลดต้นทุนในการผลิตแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ โดยวัสดุสามารถหาได้ในท้องถิ่นให้เกิดวัสดุที่มีคุณภาพดี และราคาถูกสามารถใช้งานได้

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกคิดค้นโดย Josept Aspdin มีสีเหลืองปนเทาเหมือนกับหินปูนที่ใช้ก่อสร้างเมืองปอร์ตแลนประเทศอังกฤษ เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้มีความสามารถยึดติดส่วนต่าง ๆ หรืออนุภาคของแข็งให้รวมตัวกันได้ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการเป็นวัสดุก่อสร้าง

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [8]

1. ส่วนประกอบปูนขาว (Lime component) มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นพวกแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 80 % ขึ้นไป เช่น หินปูน (Limestone) ดินขาว (Marl) และดินสอพอง (Chalk)

2. ส่วนประกอบของดินดำ (Clay) มีส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide, Al_2O_3), ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide, Fe_2O_3) เช่น ดินดาน (Shale) และ ดินดำ (Clay)

3. วัตถุดิบปรับแต่งสมบัติ (Corrective materials) ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบทางเคมีบางตัวที่มีไม่เพียงพอในดินดาน หรือดินดำวัตถุดิบเหล่านี้เช่น เพิ่มทรายเมื่อขาด SiO_2, เพิ่มแร่เหล็กหรือดินลูกรังเมื่อขาด Fe_2O_3 และเพิ่มดินเมื่อขาด Al_2O_3

4.สารเติมแต่ง (Additives) เป็นสารที่ใช้ผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซั่ม เพื่อช่วยยืดระยะเวลาในการแข็งตัว การเติมหินปูนเพื่อช่วยลดการหดตัว สารปอซโซลาน สารลดน้ำ และอื่น ๆ

2.1.2 การผลิตปูนซีเมนต์ [9]

กระบวนการผลิตปูนโดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet process) และกระบวนการแบบแห้ง (Dry process)

1.กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet process)

เริ่มจากการนำดินดำ (Clay) และดินขาว (Marl) ที่มีความชื้นสูงจากแหล่งดินตามธรรมชาติส่งมายังที่ผลิตนำมาผสมในสภาวะเปียกเติมน้ำในบ่อตีดิน (Wash mill) จากนั้นบดให้ละเอียดในหม้อบดดิน (Slurry mill) จนได้น้ำดิน (Slurry) จากนั้นกรองเอาเศษหิน และส่วนที่ไม่ละลายน้ำออกจะเหลือแต่น้ำดิน และถูกสูบไปเก็บพักยังยุ้งเก็บ (Silo) เพื่อตรวจสอบคุณภาพ และปรับแต่งส่วนผสมให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด จากนั้นสูบไปรวมกันที่บ่อกวนดิน (Slurry basin) และกวนให้เข้ากันจากนั้นส่งไปยังเครื่องป้อนน้ำดินในสภาพที่มีความชื้นสูงเข้าไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary kiln) ความร้อนในหม้อเผาจะทำให้น้ำระเหยเหลือไว้แต่เม็ดดินซึ่งเมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) และถูกลำเลียงไปเก็บในยุ้ง จากนั้นนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement mill) จนกลายเป็นปูนซีเมนต์

2.กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry process)

เริ่มจากนำวัตถุดิบ คือ ดินดาน (Shale) หินปูน (Limestone) ดินลูกรัง (Laterite) ทราย (Sand) ที่มีความชื้นปกติ และวัตถุดิบปรับแต่งสมบัติ (Corrective materials) มายังที่ผลิตจากนั้นนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผ่านเครื่องย่อย (Crusher) ในสภาวะที่แห้งเพื่อขนาดลงให้เหมาะกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป จากนั้นจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage yard) และลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิน (Raw mill) ซึ่งจะทำการบดหินปูน ดินดาน และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียดรวมกันซึ่งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal) โดยการควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบเพื่อทำให้วัตถุดิบสำเร็จมีสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผา หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ววัตถุดิบสำเร็จจะส่งไปยังเครื่องแยกวัตถุดิบผสมแล้ว (Cyclone) ไปยังยุ้งผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal homogenizing silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกันและถูกส่งไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary kiln) โดยกระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จแล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผาซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1,200 – 1,400 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) และทำให้ปูนเม็ดเย็นลงโดยการนำปูนเม็ดไปผ่านหม้อเย็น (Clinker cooler) จากนั้น

ลำเลียงปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement mill) กลายเป็นปูนซีเมนต์

2.1.3 องค์ประกอบในปูนซีเมนต์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [10]

องค์ประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	C	60 – 70
SiO_2	S	17 – 25
Al_2O_3	A	3 – 8
Fe_2O_3	F	0.5 – 6.0
MgO	M	0.1 – 4.0
Na_2O	N	0.1 – 1.8
K_2O	K	0.1 – 1.8
SO_3	$\bar{S}$	0.5 – 3.0
สารประกอบอื่น ๆ	-	0.5 – 3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition)	Loi	0.1 – 3.0
สารที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue)	-	0.20 – 0.75

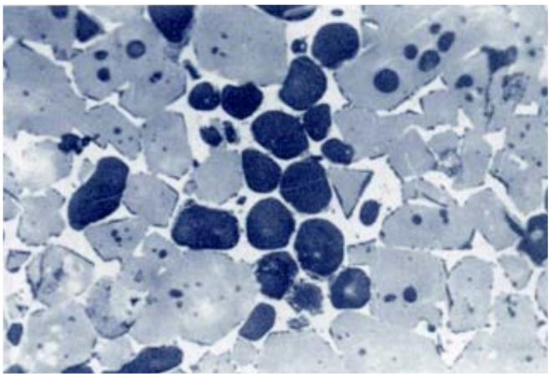
จากตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบและสัญลักษณ์ของออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีออกไซด์หลักประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ อะลูมินา ซิลิกาและเฟอร์ริกออกไซด์ โดยที่ออกไซด์ทั้ง 4 ชนิดนี้รวมกันได้ร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ และที่เหลือเป็นส่วนออกไซด์รองได้แก่ ปูนขาวอิสระ ซัลเฟอร์ไตรออกไซต์ และออกไซด์ของอัลคาไลน์ และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่ เช่น ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ และไทเทเนียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีสิ่งเจือปน และส่วนประกอบอื่นที่จัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักโดยการเผา และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สารประกอบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [11]

	สารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนักในปูนซีเมนต์
สารประกอบหลัก	ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	30-50
	ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	20-45
	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalsium Aluminate)	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	8-12
	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	6-10
สารประกอบรอง	ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Alkaline Oxides)	SO_3	-	1-2
	ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Alkaline Oxides)	K_2O และ Na_2O	-	0.5-1
	ปูนขาวอิสระ (Free Lime)	CaO	-	0.5-1

1.องค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มีลักษณะรูปร่างเป็นหกเหลี่ยมเมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวใน 2- 3 ชั่วโมง สมบัติคือให้แรงอัดในระยะแรก (Early age) ทำให้คอนกรีตเกิดความแข็งแรงได้รวดเร็ว และความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป 14 วันหลังผสม เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะให้ความร้อนค่อนข้างน้อยประมาณ 500 จูลต่อกรัม

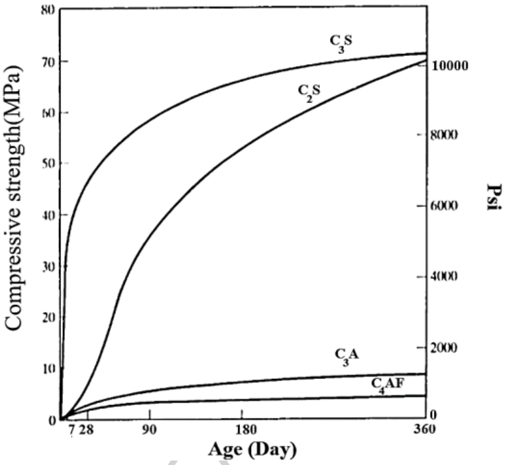


รูปที่ 1 ลักษณะของไตรแคลเซียมซิลิเกต C_3S ซึ่งเป็นรูปหกเหลี่ยม และไดแคลเซียมซิลิเกต C_2S เป็นเม็ดกลมดำ [12]

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีรูปร่างกลม มีสมบัติคือให้แรงอัดหรือให้คอนกรีตมีกำลังแข็งแรงขึ้นในระยะหลัง (Later age) เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ช้ากว่าแต่มีปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอทำให้คอนกรีตเกิดความแข็งแรงได้เมื่อให้เวลาผ่านไปประมาณ 14-28 วันหลังผสม เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้ความร้อนค่อนข้างน้อยประมาณ 250 จูลต่อกรัม

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีสมบัติคือเมื่อผสมกับน้ำเกิดการก่อตัวทันที (Flash set) โดยสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็วช่วยเร่งอัตราการให้แรงอัดในระยะแรก (1- 2 วัน) แต่คอนกรีตที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ นอกจากนี้ C_3A สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำทะเลได้เพราะสามารถถูกกัดกร่อนได้โดยซัลเฟต เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้ความร้อนค่อนข้างน้อยประมาณ 850 จูลต่อกรัม

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ทำปฏิกิริยากับน้ำได้รวดเร็วมาก ก่อตัวได้เร็วมาก แต่กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเข้ม และทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดีกว่า C_3A แต่มีความแข็งแรงน้อยมาก เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้ความร้อนค่อนข้างน้อยประมาณ 420 จูลต่อกรัม



รูปที่ 2 การพัฒนากำลังอัดของ C_3S, C_2S, C_3A และC_4AF [13]

2.องค์ประกอบรองในปูนซีเมนต์

1.ยิบซั่ม ($CaSO_4 . 2H_2O$) การนำยิบซั่มผสมเข้าไปในปูนซีเมนต์นั้นเพื่อใช้ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ปริมาณที่ใส่จึงต้องเหมาะสมเพื่อทำให้เกิดกำลังอัดสูงและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด

2.Free lime (Cao) คือแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาในการเผา การมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด เมื่อ Free lime ทำปฏิกิริยากับน้ำช้า ๆ หลังจากซีเมนต์แข็งตัวแล้วทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้

3.แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เกิดจากการเผา $MgCO_3$ จะได้ MgO ซึ่งบางส่วนจะหลอมเป็นเม็ดปูน และที่เหลือจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ MgO เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นปริมาตรจะเพิ่มขึ้นทำให้ไม่อยู่ตัว

4.อัลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O, K_2O) การนำมวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ออกไซด์มาผสมกับคอนกรีตจะทำให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1 [14]

รายการ	คุณลักษณะทางเคมี	เกณฑ์ที่กำหนด				
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
1	ซิลิคอนไดออกไซด (SiO_2) ร้อยละไม่น้อยกว่า		20.0			
2	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละไม่มากกว่า		6.0			
3	ไอร์ออน (III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละไม่มากกว่า		6.0		6.5	
4	แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละไม่มากกว่า	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
5	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละไม่มากกว่า					
	5.1 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$) ร้อยละ 8 หรือ น้อยกว่า	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
	5.2 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$) มากกว่าร้อยละ 8	3.5		4.5		
6	น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา ร้อยละไม่มากกว่า	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
7	กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ร้อยละไม่มากกว่า	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
8	ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$) ร้อยละไม่มากกว่า				35	
9	ไดแคลเซียมซิลิเกต($2CaO.SiO_2$)ร้อยละไม่มากกว่า				40	
10	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตร้อยละไม่มากกว่า		8.0	15.0	7.0	5.0
11	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรตบวกสองเท่าของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต [$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$+ $2(3CaO.Al_2O_3)$] หรือสารละลายของแข็งของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์บวกไดแคลเซียม-เฟอร์ไรต์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ + $2CaO.Fe_2O_3$) แล้วแต่กรณีร้อยละไม่มากกว่า					25.0

2.1.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [15]

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 1 และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1 ได้กำหนดเกณฑ์คุณภาพปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary portland cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้ในงานก่อสร้างธรรมดาทั่วไปเช่น เสาอาคาร กำแพง ถนน ใช้ในพื้นที่ที่อยู่ไกลจากชายทะเล

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปร (Modified portland cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงและมีการดัดแปลงให้ทนซัลเฟตได้ปานกลางทนน้ำเค็มได้จึงเหมาะสำหรับงาน สร้างเขื่อน ตอม่อสะพาน สะพานเทียบเรือ

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว (High early strength portland cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีลักษณะเนื้อปูนเป็นผงละเอียดใช้ในงานที่เร่งด่วนงานที่ต้องการกำลังอัดประลัยสูงในระยะแรก เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้น

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low heat portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่สามารถลดปริมาณความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวของปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งช่วยให้สามารถลดการหดตัวและขยายตัวของซีเมนต์ซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตที่สร้างนั้นจะไม่แตกหรือร้าวง่ายหลังจากแข็งตัวได้ส่วนใหญ่ใช้ในการสร้างเขื่อน คอนกรีตหลา

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตสูง (Sulfate resistance portland cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะมีสมบัติต้านทานซัลเฟตสูงใช้กับงานก่อสร้างที่ต้องสัมผัสกับด่าง เช่น ในบริเวณน้ำทะเล ดินที่มีความเป็นด่าง

2.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) [12]

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัว และแข็งตัวปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์สารประกอบเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างออกไปปฏิกิริยานี้เกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ

1.อาศัยสารละลาย เมื่อปูนซีเมนต์ละลายน้ำจะก่อให้เกิดไอออน (Ions) ในสารละลาย และเมื่อไอออนนี้ผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2.การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยตรงระหว่างผิวของแข็งซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย

ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น 2 ลักษณะโดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งอาจจำแนกปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ทำกับสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ 3 ชนิดดังนี้

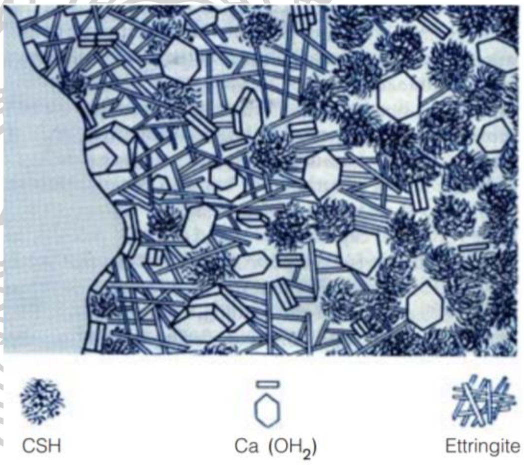
1.ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S) จะทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C–S–H) ทำหน้าที่ช่วยยึดเกาะกับวัสดุผสมอื่นๆ สำหรับปฏิกิริยาแสดงดังนี้ [12]

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

หรือ $$2C_3S + 6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

หรือ $$2C_2S + 4H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$$



รูปที่ 3 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซิลิเกต [12]

มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดทันที และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์ดังสมการต่อไปนี้[12]

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$$

หรือ $$C_3A + 6H_2O \longrightarrow 3C_3AH_6$$

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็วจึงใส่ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จากยิบซั่มนั้นจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียม

อะลูมิเนต (C_3A) ก่อให้เกิดชั้นของ Callium Sulforaluminate Hydrate (Ettringite) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ดังสมการต่อไปนี้ [12]

$$C_3A + CaSO_2 \cdot 2H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_2 + 31H_2O$$

(Ettringite)

ชั้นของ Ettringite จะเข้าไปปกคลุมทำให้ C_3A ทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาจากนั้นเมื่อ Ettringite ปกคลุมมากขึ้นจะเกิดแรงดันเนื่องจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง Ettringite จะแตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตที่เหลืออยู่ก็จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่มให้เกิด Ettringite ใหม่อีกครั้งขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จากยิบซั่มมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะเกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

3.ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาระหว่างเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ยิบซัมจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการต่อไปนี้ [12]

$$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 3CaSO_4$$

<u>ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น</u>

1.อายุของเพสย์ซีเมนต์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากที่สุดในช่วงแรก และเริ่มลดลง

2.องค์ประกอบของซีเมนต์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์แตกต่างกัน

3.ความละเอียดของซีเมนต์ ยิ่งซีเมนต์นั้นมีความละเอียดสูงก็จะมีพื้นผิวสัมผัสกับน้ำมากทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้เร็ว

4.อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะไม่กระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรกแต่ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเฉลี่ยจะลดลงด้วย

5.อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณภูมิเพิ่มขึ้นโดยที่การเพิ่มอุณหภูมินั้นไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์ซีเมนต์

6.น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.1.6 วัสดุปอซโลลาน (Pozzolan material)

วัสดุปอซโซลานคือวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินา เช่น เถ้าแกลบ หินเซอร์ท เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหิน ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลยแต่เมื่อบดจนละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่อุณหภูมิปกติร่วมกับความชื้นก่อให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิคสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [16]

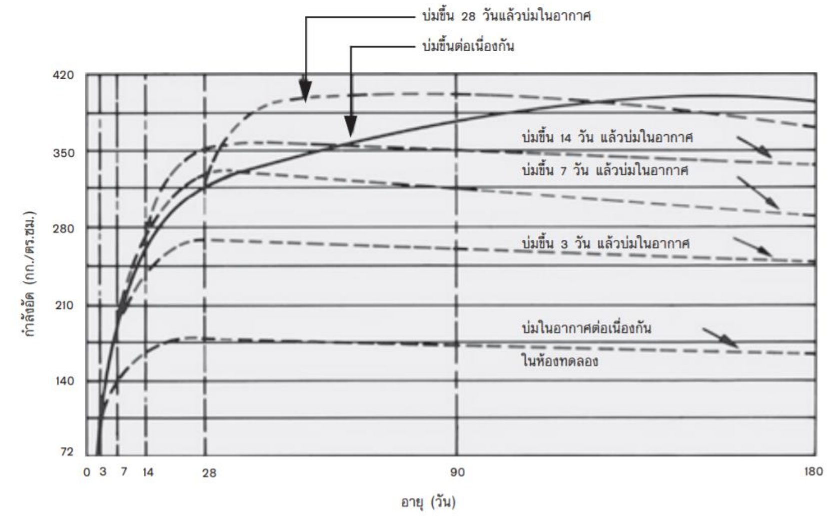
$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO \cdot SiO_2 \cdot 3H_2O$$

และกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [16]

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 3H_2O$$

2.1.7 การบ่มคอนกรีต (Concrete curing) [17]

การบ่มคอนกรีตคือวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งการบ่มคอนกรีตต้องป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีต เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และต้องรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดและมีความทนทาน โดยทั่วไปกำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆหลังจากบ่ม 28 วัน การเพิ่มกำลังอัดจะช้าแต่ก็เพิ่มขึ้นตลอดหากมีกระบวนการบ่มที่ดี ดังนั้นเราควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้การบ่มสามารถแบ่งออกเป็นประเภทตามอุณหภูมิที่ใช้บ่มคือ การบ่มที่อุณหภูมิปกติ การบ่มที่อุณหภูมิสูง การบ่มด้วยไอน้ำความกดดันต่ำ และการบ่มด้วยไอน้ำความกดดันสูง



รูปที่ 4 ผลของการบ่มต่อกำลังอัด [17]

1.การบ่มที่อุณหภูมิปกติ

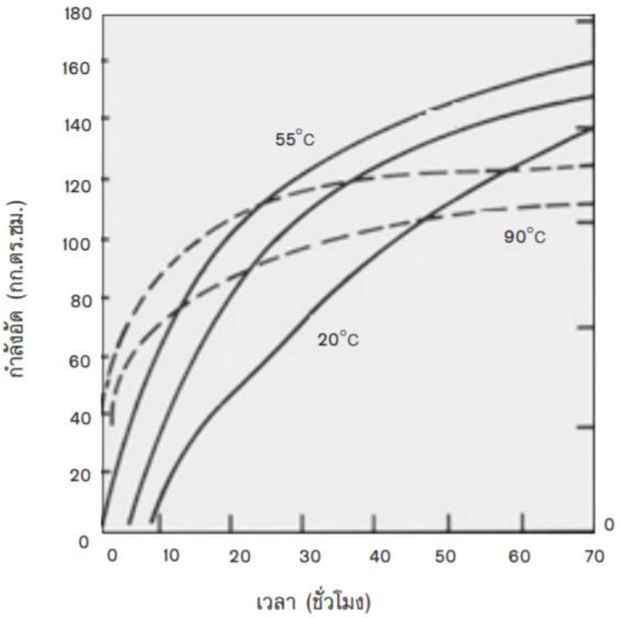
การบ่มที่อุณหภูมิปกติทำได้โดยวิธีการเพิ่มความชื้นให้กับผิวหน้าคอนกรีตโดยตรง เช่น การขังน้ำ การฉีดพรมน้ำ การใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม และวิธีการป้องกันการเสียน้ำออกจากเนื้อคอนกรีตซึ่งเป็นการป้องกันความชื้นไม่ให้ออกสู่ภายนอก เช่น การใช้กระดาษกันน้ำได้คลุม การใช้แผ่นพลาสติกคลุม การใช้น้ำยาเคมีเคลือบผิวคอนกรีต

2.การบ่มที่อุณหภูมิสูง

การบ่มวิธีนี้เป็นการเร่งอัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถผลิตได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดแบบหล่อ และมีกำลังอัดที่สูงเร็ว แบ่งเป็นการบ่มด้วยไอน้ำความกดดันต่ำ และการบ่มด้วยไอน้ำที่ความดันสูง

2.1 การบ่มด้วยไอน้ำความดันต่ำ (Low pressure stream curing)

การบ่มด้วยไอน้ำความดันต่ำจะบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 65-80 องศาเซลเซียส การบ่มด้วยไอน้ำความดันต่ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังอัดสูงแต่จะมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ต่ำแต่การบ่มด้วยไอน้ำความดันต่ำที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังอัดต่ำแต่จะมีค่ากำลังอัดสูงสุดสูง



รูปที่ 5 ผลของการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำที่ความดันต่ำต่อกำลังของคอนกรีต [17]

2.2 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความดันสูง (High pressure stream curing)

การบ่มด้วยไอน้ำที่ความดันสูงจะบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 160-210 องศาเซลเซียส ความดัน 6 – 20 atm จะทำให้คอนกรีตเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งมีสมบัติที่แตกต่างจากการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีข้อดีคือสามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 ชั่วโมง คอนกรีตมีกำลังสูงเท่ากับการบ่มปกติเป็นเวลา 28 วัน มีการหดตัวและการล้าลดลงมากสามารถทนเกลือซัลเฟตได้ดีขึ้น และมีความชื้นภายหลังการบ่ม แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง

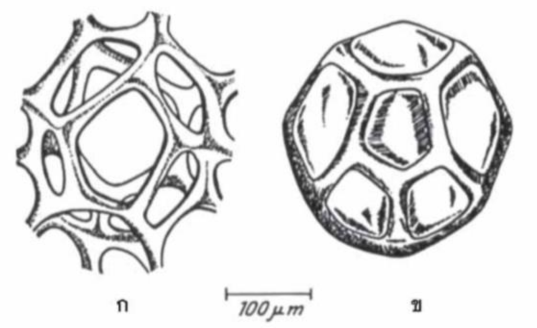
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโฟม [18]

โฟมพลาสติก (Plastic foam) หรือเรียกว่า Expanded plastic หมายถึง พลาสติกที่มีโพรงเล็ก ๆจำนวนมากกระจายอยู่ในเนื้อโดยในการผลิตจะใช้สารฟู (Blowing agent) ทำให้พลาสติกเกิดการขยายตัว

2.2.1 ลักษณะโฟมแบ่งออกตามลักษณะของเซลล์

1.โฟมเซลล์เปิด (Open-cell foam) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ทำให้แก๊สสามารถเคลื่อนที่ผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่น ๆ ได้ภายใต้การกระทำของแรงขับ โดยโฟมเซลล์เปิดจะเตรียมจากเทคนิคความดันต่ำ (Low-pressure technique) โฟมชนิดนี้มีสมบัติยืดหยุ่น ทำให้เหมาะในการใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ ที่นอน บรรจุภัณฑ์ และวัสดุกันกระแทก

2.โฟมเซลล์ปิด (Closed-cell foam) สัณฐานโครงสร้างของเซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบาง ๆ เรียกว่าหน้าต่างเซลล์ทำให้แก๊สไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้แต่การเคลื่อนที่ของแก๊สจะกระทำโดยการแพร่ผ่านผนังเซลล์ โดยปกติโฟมเซลล์ปิดจะเตรียมโดยใช้เทคนิคความดันสูง (High-pressure technique) โฟมแบบนี้จะแข็งและเหมาะในการนำไปใช้งานเป็นฉนวนความร้อนทุ่นลอย หรือใช้ในเสื้อชูชีพ



รูปที่ 6 สัณฐานโครงสร้างของโฟม ก) เซลล์เปิด ข) เซลล์ปิด [18]

2.2.2 ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

1) โฟมยืดหยุ่น (Flexible foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (Glass transition temperature: T_g) ที่ต่ำ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น และคืนตัวเมื่อถูกกดได้ง่าย เช่น โฟมยาง โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดเสริมสภาพพลาสติก (PPVC) โฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่น (Polyurethane elastomer)

2) โฟมชนิดแข็ง (Rigid foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะผลึก (Crystalline state) แต่ถ้าอยู่ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous state) จะมีอุณหภูมิสภาพแก้วที่สูง มีลักษณะแข็ง ไม่คืนตัวเมื่อถูกกด เช่นโฟมพอลิโอเลฟิน (Polyolefin foam) โฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene foam)

โฟมพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate foam) โฟมพอลิฟีนอลิก (Phenolic foam) และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (Rigid polyurethane foam)

3. โฟมชนิดกึ่งแข็ง (Semi-rigid foam) มีลักษณะอยู่ระหว่างโฟมชนิดแข็ง และชนิดยืดหยุ่น โฟมชนิดนี้จะมีมอดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่นแต่มีพฤติกรรมทางความเค้นความเครียด (Stress-stain) คล้ายกับโฟมชนิดยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดแข็ง

2.2.3 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation)

วิธีการเตรียมโฟมพลาสติกนั้นสามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการขยายตัว (Expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> การเกิดฟอง (Bubble formation or Initiation)

ขั้นแรกของกระบวนการเกิดโฟมเป็นการทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้น และขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลวกระบวนการการเกิดฟองนี้เรียกว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ

1 การเกิดนิวเคลียสในตนเอง (Self-nucleation) คือฟองแก๊สจะเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

2 กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation process) คือฟองแก๊สจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (Liquid-solid interphase) ซึ่งของแข็งนี้เรียกว่าสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) การทำให้พลาสติกเกิดฟองแก๊สในโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

1. การสลายตัวทางความร้อนของสารฟูทางเคมีจากการผสมสารฟูที่เป็นของแข็งกับพอลิเมอร์ และให้ความร้อนทำให้สารฟูสลายตัวเกิดเป็นแก๊สขึ้น เช่น แก๊สไนโตรเจน(N_2) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น

2. การเกิดฟองเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งแก๊สจะปล่อยออกมาพร้อมกับการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) และการเชื่อมขวาง

3. การลดความดัน เป็นการขยายตัวของแก๊สในเนื้อพอลิเมอร์โดยการลดความดันในระบบพอลิเมอร์ตัวอย่างเช่น การอัดรีด (Extrusion) โฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS)

4. การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพลาสติกซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อนกับสารฟูที่เป็นของเหลว สารฟูที่ใช้จะเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ

5. การใช้ตัวเต็มชั่วคราว วิธีนี้ไม่มีการผลิตแก๊สขึ้นแต่จะใช้อนุภาคของแข็งผสมกับพอลิเมอร์แล้วขึ้นรูปเป็นพลาสติกแข็ง จากนั้นชะ (Leach) สารตัวเติมออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมทำให้ได้ชิ้นงานที่มีเซลล์เปิดเกิดขึ้น

6. การเก็บกักแก๊สเชิงกล คือการทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว แล้วทำให้แข็งตัวโดยสารเร่งปฏิกิริยา และความร้อนทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่าและมีข้อเสียคือโฟมที่ได้จะมีเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> การเพิ่มขนาดฟอง (Bubble growth)

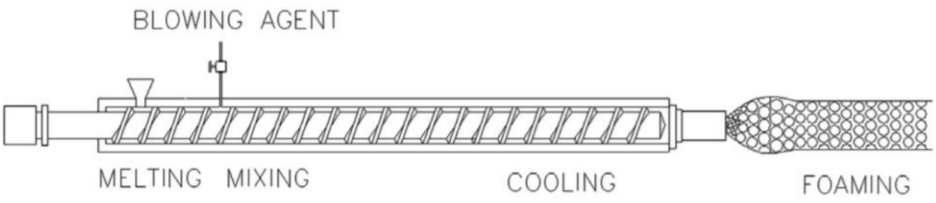
การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้ภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความดันระหว่างภายใน และภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์แรงตึงผิวที่สัมผัส และรัศมีของฟอง

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> ความเสถียรหรือการคงรูปของฟอง (Bubble stability)

กระบวนการเกิดโฟมซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นโดยการเกิดปฏิกิริยาของพอลิเมอร์เมทริกซ์กลายเป็น Gelation โดยการทำให้เทอร์โมพลาสติกที่ขยายตัวแล้วเย็นตัวลงที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์และปัจจัยในการการถ่ายเท (Drainage) ของของเหลวจากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (Cell junction) ทำให้เกิดรอยแตกได้โดยวิธีทำให้ภาวะโฟมเสถียรมีหลายวิธีได้แก่ การควบคุมความหนืดที่ให้มีความเหมาะสม

2.2.4 โฟมอีพีเอส [19, 20]

โฟมอีพีเอส หรือ Expandable polystyrene foam (EPS) เกิดจากการป้อนพอลิสไตรีน (PS) สู่เครื่องอัดรีด (Extrusion) โดยมีการผสมแก๊ส Pentane (C_5H_{12}) หรือ Butane (C_4H_{10}) เป็นสารที่ทำให้เกิดการขยายตัว (Blowing agent) ระหว่างกระบวนการผลิตโดยที่พอลิสไตรีน (PS) จะกักเก็บแก๊สเหล่านี้ไว้ภายใน เมื่อนำมาผลิตโฟม EPS จะเกิดการขยายตัวของแก๊สเพนเทนที่อยู่ในเม็ด EPS ภายใต้ความร้อนจากไอน้ำ (Steam) กลายเป็นเม็ดโฟม จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป (Molding) ต่อไป



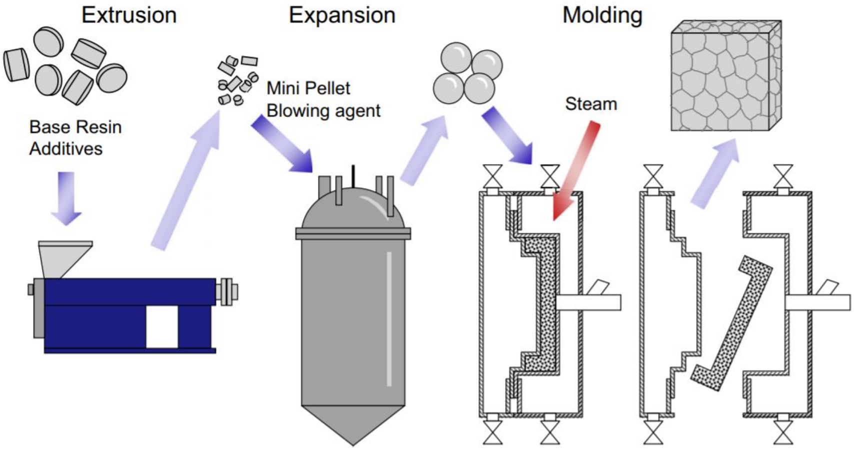
รูปที่ 7 กระบวนการ Extrusion foaming process [20]

2.2.4.1 ขั้นตอนการขึ้นรูป

1.Pre-expansion เมื่อให้ความร้อนในรูปไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 90 – 100 องศาเซลเซียส กับเม็ด EPS เนื้อพลาสติกจะเริ่มอ่อนตัวเพนเทนซึ่งเป็นสารพองตัวอยู่ในเม็ดจะระเหยทำให้เกิดแรงดันภายในขยายตัวเป็นเม็ดโฟม โดยทั่วไปจะขยายตัวได้ถึง 30 -50 เท่าแล้วแต่ความหนาแน่นที่ต้องการขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้นึ่ง

2.การอบอ่อน (Aging) หลังจาก Pre-expansion เม็ดโฟมจะถูกส่งไปเก็บในไซโลที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวกเพนเทนซึ่งเป็นสารพองตัวจะแพร่ออกมานอกเม็ดโฟมขณะเดียวกันอากาศที่อยู่รอบๆ จะซึมเข้าไปในเซลล์ของเม็ดโฟมจนถึงสภาวะสมดุลเม็ดโฟมจะมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปขึ้นรูปได้

3.การขึ้นรูป (Moulding) เม็ดโฟมจะถูกใส่เข้าไปในแม่พิมพ์และจะขยายตัวหลอมติดกันได้รูปทรงตามต้องการภายใต้ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 - 110 องศาเซลเซียสเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับ เกรดพลาสติด ระยะพักตัว ความหนาแน่น และการตั้งค่าเครื่องจักรในการขึ้นรูป



รูปที่ 8 ตัวอย่างการขึ้นรูปโฟมด้วยเม็ดโฟม [20]

2.2.5 สมบัติของโฟมโดยทั่วไป

โฟมโดยทั่วไปนั้นมีสมบัติที่เบา มีความหนาแน่นต่ำ สามารถลดการผ่านของเสียงได้ ป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ มีความยืดหยุ่นสูงกันกระแทกได้ดี แต่สมบัติต่างๆของโฟมยังขึ้นอยู่กับเทคนิคและสภาวะการผลิต การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของพอลิเมอร์ สารเติมแต่ง สารฟูที่ใช้สมบัติของโฟมจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของแก๊สต่อพอลิเมอร์หรือเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของโฟม ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของโฟมจากสมบัติเชิงกลของโฟมส่วนปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของโฟมขึ้นกับความหนาแน่นและองค์ประกอบของเฟสพอลิเมอร์ แต่ความร้อนส่วนใหญ่นั้นจะถ่ายเทผ่านเฟสของแก๊สที่ใช้เป็นสารฟูซึ่งแก๊สที่ใช้นี้จะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำดังตารางที่ 4 โฟมจึงมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำด้วย

ตารางที่ 4 ค่าการนำความร้อนของแก๊สชนิดต่างๆที่ใช้เป็นสารฟูที่ 20 องศาเซลเซียส [21]

สารประกอบ	ค่าสภาพนำความร้อน (W/m K)
Trichlorofluoromethane (CFC-11)	0.0084
Dichlorodifluoromethane (CFC-12)	0.0098
Trichlorotrifluoroethane	0.0072
Dichlorotetrafluoroethane	0.0104
Dichlorofluoromethane	0.0112
Dichloromethane	0.0063
Methyl chloride	0.0105
2-Methylpropane	0.0161
Nitrogen	0.0260
Carbon dioxide	0.0168
Carbon monoxide	0.0250
Air	0.0259

2.2.6 ประโยชน์และการใช้งานโฟมพลาสติก

1. ใช้เป็นฉนวนความร้อน (Thermal insulation) ในอุตสาหกรรมตู้เย็น ฉนวนความร้อนบนหลังคา ฝากระโปรงหน้ารถยนต์

2. บรรจุภัณฑ์ (Packaging) เช่น ใช้เป็นกล่องโฟมใส่อาหาร โฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุสินค้า

3. ทำเบาะหรือนวม (Cushioning)

4. วัสดุลอยตัว (Buoyancy) เช่น ทุ่นลอยในทะเล กระดานโต้คลื่น และเสื้อชูชีพ

5. วัสดุดูดซับและป้องกันเสียง (Sound absorption and insulation) เช่น ผนังโรงภาพยนตร์ ห้องอัดเสียง และห้องประชุมต่าง ๆ

6. งานโครงสร้าง (Structure) ที่มีลักษณะเบา เช่น ทำเฟอร์นิเจอร์ ทำโครงสร้างของเครื่องบิน ซีเมนต์บอร์ด

2.2.7 อันตรายจากโฟมอีพีเอส [22]

สารสไตรีน เป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งในกลุ่ม 2B ตามมาตรฐานของ International agency for research on cancer (IARC) ที่อาจก่อมะเร็งในมนุษย์ สารสไตรีนสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ทุกทางตั้งแต่การดูดซึมผ่านผิวหนังจนถึงทางระบบทางเดินหายใจสามารถแพร่กระจายเข้าสู่สมองและอวัยวะต่าง ๆได้ดีทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง และทางเดินหายใจ แต่ถ้าร่างกายได้รับสารดังกล่าวต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานส่งผลให้มีการเปลี่ยนสารสไตรีนที่สะสมไว้เป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenicity) และมีพิษต่อตับ (Hepatotoxicity) แม้ว่าในร่างกายจะมีกระบวนการทางเคมีที่ช่วยกำจัดสารพิษก็ตามสารเบนซีนเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงและเป็นสารก่อมะเร็งในกลุ่ม 1 ตามมาตรฐานของ International agency for research on cancer (IARC) ที่ก่อมะเร็งในมนุษย์ซึ่งอาการของผู้ที่ได้รับเบนซีนเข้าไป คือ ในระยะแรก ๆจะเกิดอาการวิงเวียน คลื่นไส้ ถ้าดื่มหรือกินอาหารที่มีเบนซีนปนเปื้อนอยู่จะทำให้มีอาการปวดท้องเนื่องจากกระเพาะถูกกัดกร่อนหัวใจเต้นแรง อาจรุนแรงจนถึงขั้นเสียชีวิตได้และเมื่อสูดดมเป็นเวลานานจะทำให้เป็นโรคมะเร็งเม็ดเลือด (Leukemia) และโรคโลหิตจาง (Anemia)

สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากพลาสติกโฟมใช้เสร็จแล้วทิ้งไม่นิยมนำกลับมาใช้ใหม่ และในประเทศไทยไม่มีอุตสาหกรรมรีไซเคิลโฟมที่แพร่หลายโฟมจึงสร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นขยะที่ใช้พื้นที่ในการฝังกลบมากและไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่สามาถทำปุ๋ยได้ ถ้าเผาก็ก่อให้เกิดมลพิษสิ่งแวดล้อม

2.3 เส้นใย (Fibers) [23, 24]

2.3.1 ประเภทของเส้นใย

การแยกประเภทของเส้นใยสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เส้นใยประดิษฐ์ และเส้นใยธรรมชาติ

1.เส้นใยประดิษฐ์ (Man-made fibers) เป็นเส้นใยที่เกิดขึ้นมาจากการคิดค้นและปรับปรุงของมนุษย์เพื่อใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถแบ่งเส้นใยประดิษฐ์ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- เส้นใยสังเคราะห์จากเซลลูโลส เช่น เรยอน อะซิเทต ไตรอะซีเทต
- เส้นใยสังเคราะห์จากสารเคมี เช่น โอเลฟินส์ พอลิเอสเทอร์ พอลิอะรามิด ไนลอน
- เส้นใยสังเคราะห์จากแร่และเหล็ก เช่น โลหะ แก้ว เซรามิก แกรไฟต์

2.เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งได้เป็น

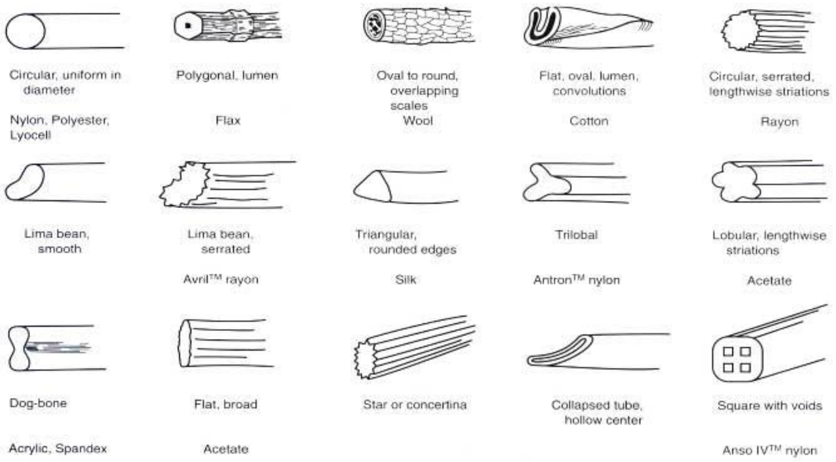
- เส้นใยพืช เช่น ลินิน ป่าน นุ่น ปอ รามี ฝ้าย
- เส้นใยสัตว์ เช่น ไหม เส้นผม ขนสัตว์
- แร่ เช่น แร่ใยหิน

2.3.2 สมบัติของเส้นใย

สมบัติของเส้นใยธรรมชาตินั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1.ความยาวเส้นใย ซึ่งเส้นใยมีทั้งชนิดสั้นและยาวโดยเส้นใยสั้นจะมีความยาวอยู่ในช่วง 2 ถึง 46 เซนติเมตรซึ่งความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์

2.ภาพตัดขวางของเส้นใย คือรูปร่างตามแนวตัดขวางของเส้นใยซึ่งรูปร่าง ภาพตัดขวางของเส้นใยธรรมชาติเกิดจากลักษณะการสร้างเซลลูโลสในขณะที่พืชเจริญเติบโตหรือในกระบวนการสร้างโปรตีนของสัตว์ ซึ่งสมบัติเชิงกลและสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนก็จะขึ้นอยู่กับลักษณะภาพตัดขวางของเส้นใยนี้



รูปที่ 9 ภาพตัดขวางของเส้นใยแต่ละชนิด [23]

3.ความหยักของเส้นใย มีช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยทำให้สามารถคืนตัวจากแรงอัดได้ดีและทนต่อแรงเสียดสี

4.องค์ประกอบทางเคมีและการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งเส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียกว่าพอลิเมอร์โดยจะมีน้ำหนักโมเลกุล การจัดเรียงตัว และความเป็นผลึกที่แตกต่างกันในเส้นใยแต่ละชนิดซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของเส้นใย

5.ความสามารถในการดัดงอ (Flexibility) เส้นใยที่ดีจะต้องบิดตัวหรือโค้งงอได้ โดยไม่หักหรือขาด และเมื่อปล่อยแรงบิดหรือโค้งงอแล้วจะคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ดี

6.ความหนาแน่น (Density) เส้นใยมีความหนาแน่นต่ำมีความสามรถในการคืนกลับตัวที่ดีเนื่องจากมี จำนวนของเส้นใยต่อน้ำหนักสูงกว่าจึงช่วยเสริมแรงให้เกิดแรงในการคืนตัวกลับที่มากกว่า

7.ความสามารถในการดูดซึมความชื้น (Moisture regain) ซึ่งเส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่นั้นสามารถดูดซึมน้ำได้ดีเนื่องจากมีส่วนที่กักเก็บน้ำภายในโครงสร้างเส้นใยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ได้ดี

8.ความทนทานต่อความร้อนของเส้นใย (Thermal resistance) เส้นใยธรรมชาตินั้นมีความสามารถเป็นฉนวนทางความร้อนได้ดี

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมะพร้าว [25]

รูปที่ 10 ภาพถ่ายต้นมะพร้าว [26]

มะพร้าวมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Cocos nucifera Linn. ชื่อสามัญ Coconut อยู่ในตระกูล Palmae หรือ Arecaceae เป็นพืชยืนต้นใบเลี้ยงเดี่ยว อยู่ในตระกูลปาล์ม

Class: Angiospermae

Subclass: Monocotyledoneae

Order: Palmales

Family: Palmae

Subfamily: Cocoideae

Tribe: Cocoideae

Genus: Cocos

Species: Nucifera

2.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะพร้าว

ลำต้น มีลำต้นเดียว ไม่แตกแขนง มีรอยแผลจากการหลุดร่วงของใบตลอดลำต้นสามารถคำนวณอายุของต้นมะพร้าวได้จากรอยแผลนี้ คือ ในปีหนึ่งมะพร้าวจะสร้างใบประมาณ 12 - 14 ใบ

ใบเป็นใบประกอบออกอยู่ตามส่วนของลำต้นประกอบด้วยก้านทาง (Rechis) มีขนาดใหญ่และยาว และมีใบย่อย (Leaflet) บนก้านทางประมาณ 200 – 250 ใบ

ดอกจะออกเป็นช่อชนิดพานิเคิลมีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อเดียวกันดอกมีกลีบดอก 6 กลีบ สีครีมหรือสีเหลืองนวล ไม่มีก้านดอกย่อยดอกตัวเมียจะมีกลีบดอกหนา และแข็งกว่ากลีบดอกตัวผู้

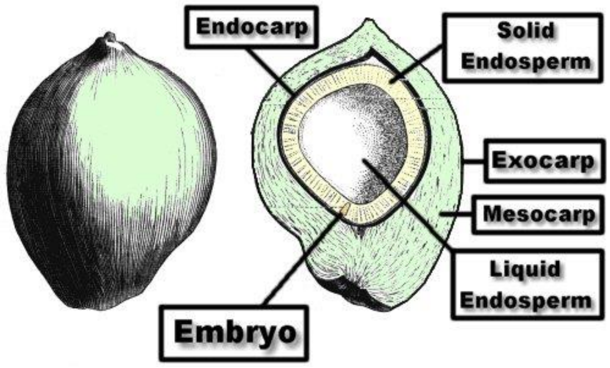
ผลมะพร้าวเป็นผลชนิดที่มีเมล็ดเดียวอยู่ตรงกลาง และมีเปลือกหุ้มเมล็ดที่แข็งซึ่งในทางพฤกษศาสตร์จะเรียกผลชนิดนี้ว่า (Fibrous drupe) เรียกว่า นัท (Nut) มีเปลือก 3 ชั้นคือ

1. เปลือกชั้นนอก (Exocarp outer layer) เป็นเส้นใยที่เหนียวและแข็งเมื่อแก่อาจมีสีเขียว แดง เหลือง หรือน้ำตาล

2. เปลือกชั้นกลาง (Mesocarp fleshy middle layer) มีลักษณะเป็นเส้นใย มีความหนา เรียกว่า กาบมะพร้าว

3. เปลือกชั้นใน (Endocarp) มีลักษณะแข็งหรือที่เรียกกันว่า กะลา (Shell)

4. เมล็ด (Seed) คือน้ำมะพร้าวและเนื้อมะพร้าวเป็นส่วนของเอ็นโดสเปิร์ม (Endosperm)



รูปที่ 11 ส่วนประกอบของลูกมะพร้าว [25]

2.4.2 เส้นใยมะพร้าว

เส้นใยมะพร้าวเป็นส่วนที่แยกได้มาจากเปลือกชั้นกลาง (Mesocarp fleshy middle layer) หรือกาบมะพร้าว โดยเส้นใยที่แยกออกมามีลักษณะยืดหยุ่นเหนียว แข็งแรง ทนทาน นอกจากนี้เส้น

ใยมะพร้าวที่มาจากผลมะพร้าวอ่อนจะมีสีเหลือง และเส้นใยที่มาจากผลมะพร้าวแก่จะมีสีน้ำตาลไหม้ เราสามารถแบ่งคุณภาพของใยมะพร้าวออกเป็น 2 ระดับ คือ

1. ใยมะพร้าวคุณภาพต่ำ มีลักษณะเป็นปุ่มปมขรุขระ มีเศษกาบใยปะปนอยู่บ้าง ความยาวเส้นใยไม่แน่นอน เส้นใยมีความขรุขระเส้นใยคุณภาพต่ำนี้เรียกว่า Bristle fiber
2. ใยมะพร้าวคุณภาพสูง มีลักษณะเป็นเส้นใยเรียบเสมอ ความยาวเส้นใยประมาณ 2 - 10 เซนติเมตร เส้นใยชนิดนี้เรียกว่า Mattress fiber แปลว่า ใช้สำหรับเส้นใยสำหรับทำที่นอน

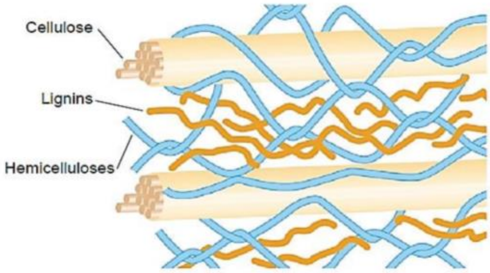
รูปที่ 12 เส้นใยมะพร้าว [27]

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว [28, 29]

องค์ประกอบทางเคมี	เปอเซ็นต์
Water soluble	5.25
Pectin and related compounds	3.00
Hemicellulose	0.25
Lignin	45.84
Cellulose	43.44
Ash	2.22

2.4.2.1 ส่วนประกอบเส้นใยมะพร้าว

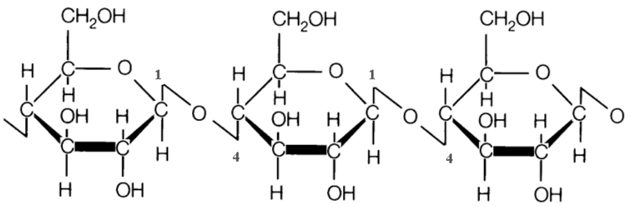
โดยทั่วไปผนังเซลล์พืช (Plant cell wall structure) จะประกอบไปด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และอื่นๆ



รูปที่ 13 เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบภายในผนังเซลล์ [30]

1.เซลลูโลส (Cellulose)

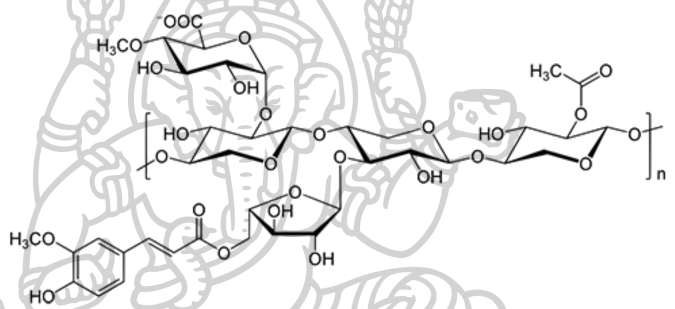
เซลลูโลส (Cellulose) มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติประกอบด้วยสารประเภทคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ชนิดโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homo-polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และโครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุล ของกลูโลส (Glucose) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เป็นหลัก เรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง β (1-4 Glycosidic bond) เป็นสายยาวที่มีโมเลกุลกลูโคสประมาณ 1,000 - 10,000 โมเลกุล โดยจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเซลลูโลสจะมีหน่วยซ้ำที่เรียกว่าเซลโลไบโอส (Cellobiose) และทุก ๆ หน่วยที่สองของกลูโลสที่ต่อกันในโมเลกุลของเซลลูโลสจะสามารถหมุนได้ 180 องศาเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลกลูโคสทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรง มีอุณหภูมิการหลอมตัวสูงและไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไปแต่สามารถละลายได้ดีในกรดแก่หรือด่างแก่ [31]



รูปที่ 14 โครงสร้างของเซลลูโลส [31]

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

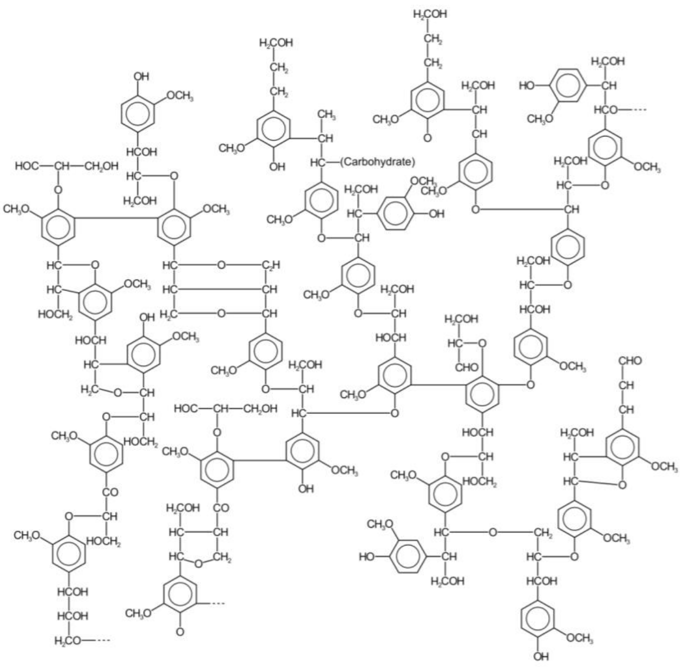
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) พบมากรองมาจากเซลลูโลส และมักรวมอยู่กับลิกนิน มีลักษณะเป็นคล้ายอนุพันธ์ของเพนโตส (Pentose) ส่วนมากเป็น ดีไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) หลายๆโมเลกุลต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่ง (β - (1-4)) โดยสายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกันเช่น เพนโตแซน (Pentosan) เฮกโซแซน (Hexosan) ส่วนใหญ่เป็นไซแลน และ อะราแบน (Araban) พอลิยูโรไนด์ (Polyuronides) และน้ำตาลชนิดอื่นๆ โดยเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจางที่อุณหภูมิสูง และสามารถละลายได้ในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ เฮมิเซลลูโลสยังมีลักษณะเป็นกิ่งมากกว่าเซลลูโลส แต่มีความยาวของสายพอลิเมอร์สั้นกว่าเซลลูโลส



รูปที่ 15 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสโดยทั่วไป [28]

3.ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน (Lignin) หรือ Lignen เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีความซับซ้อน มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{10}H_{12}O_4$ มีหน่วยย่อย 3 มอนอเมอร์ที่เป็นสารจำพวกอะโรมาติก คือ พาราโควมาริลแอลกอฮอล์ (p-Coumary alcohol), โคนิเฟอริลแอลกอฮอล์ (Coniferyl alcohol) และ ไซนิพริลแอลกอฮอล์ (Sinapyl alcohols) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์จำนวนมากแทรกอยู่ที่ผนังเซลล์ของพืชส่งผลให้ลิกนินมีสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่มีความยืดหยุ่น แต่มีความแข็งแรงทนทาน และลิกนินนั้นมีโครงสร้างเป็นร่างแหทำหน้าที่เชื่อมโยงโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสให้ติดกันภายในผนังเซลล์พืช



รูปที่ 16 โครงสร้างของลิกนิน [30]

ตารางที่ 6 สมบัติของเส้นใยมะพร้าว [32]

สมบัติ	ค่า
Gravimetric fineness	40 tex
Breaking load	0.45 kg
Tenacity	10 g/tex
Extension at break	29.13 %
Flexural rigidity	200 dynes/cm^2
Modulus ของ torsional rigidity	1.89 x 10^{10} dynes/cm^2
Density	1.4 g/cc
Porosity	40 %
Moisture regain ที่ 65 %R.H	10.50 %
Transverse swelling ใน water	5 %

2.4.2.2 ประโยชน์ของเส้นใยมะพร้าว [33]

- เป็นวัตถุดิบในการผลิตที่นอนเพื่อสุขภาพ และเตียงนอนโรงพยาบาล เนื่องจากมีสมบัติของการถ่ายเทอากาศสูง
- ใช้เป็นฉนวนในการดูดซับเสียงสำหรับห้องบันทึกเสียง
- ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการสั่นสะเทือน เหมาะสำหรับสินค้าประเภทเฟอร์นิเจอร์ เช่น เป็นวัสดุภายในที่นั่งโดยสารบนเครื่องบินโดยสาร
- ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น การใช้เป็นที่ยึดเกาะของรากต้นกล้า และต้นกล้วยไม้ หรือใช้แทนหญ้าและฟางคลุมพื้นดินรอบ ๆ ต้นไม้ เพื่อรักษาความชื้น
- ใช้ปกคลุมที่โล่ง และแท่นที-ออฟ ของสนามกอล์ฟเพื่อเก็บกักความชื้นสำหรับหญ้า
- เป็นอุปกรณ์ป้องกันการพังทลายของดินริมตลิ่ง หรือเป็นเขื่อนป้องกันการซัดของคลื่นริมแม่น้ำ
- ใช้ผลิตเชือกเกลียวที่มีความเหนียว แข็งแรง ทนทาน มีสมบัติใกล้เคียงกับเชือก
- ใช้ผลิตแปรง ไม้กวาด และพรมเก็บดักฝุ่นภายนอกอาคาร ซึ่งพรมใยมะพร้าวจะมีอายุการใช้งานยาวนาน
- ใช้ผลิตเป็นแผ่นกรองหยาบ เช่น ฝุ่นเหนียว ฟิงโคท สีฝุ่น เรซิน กาว ยางมะตอย
- ใช้ผลิตเป็นส่วนประกอบของอิฐมวลเบา
- ใช้ผลิตเป็นแผ่นกรองหยาบ เช่น ฝุ่นเหนียว ฟิงโคท สีฝุ่น เรซิน กาว ยางมะตอย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.5 การพัฒนาซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

คอนกรีตนั้นเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติที่ดีในเรื่องของการรับแรงกดอัดแต่มีจุดด้อยคือรับแรงดึงหรือการดัดงอได้น้อย เปราะ ดังนั้นจึงมีความพยายามหาวิธีการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวโดยการนำวัสดุที่เหนียวมาใช้เป็นส่วนผสมเช่น เส้นใยมะพร้าว เส้นใยสับปะรดซึ่งทำให้ซีเมนต์นั้นมีประสิทธิภาพรับแรงดัดเพิ่มขึ้น อีกทั้งเส้นใยจะเข้าไปขัดขวางการแพร่ของรอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อคอนกรีตนั้นได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันทีเนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยเส้นใยทำให้ซีเมนต์ที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

1.Aspect ratio (L/D) ของเส้นใย [34]

ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความยาวเส้นใยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยมีค่า Critical aspect ratio (l_c /D) เป็นค่าต่ำสุดที่สามารถส่งผ่านความเค้นจากเมทริกซ์สู่เส้นใยได้ การที่มีค่า Aspect ratio ต่ำกว่า Critical aspect ratio จะทำให้วัสดุอ่อนแอเนื่องจากเส้นใยสั้นเกินไปจนไม่สามารถรับแรงเค้นได้ หาก Aspect ratio มีค่ามากเกินไปอาจทำให้เส้นใยนั้นพันกัน และกระจายตัวได้ไม่ดีในระหว่างการผสมสมบัติของวัสดุที่ได้ก็จะไม่ดี

2. ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ [35]

1.การจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันตามความยาวเส้นใยจะให้ความแข็งแรงสูงสุดไปตามทิศทางของการจัดแนวเท่านั้น แต่คอมโพสิตจะอ่อนแอลงอย่างมากในทิศทางอื่น ๆ

2.การจัดเรียงแบบสุ่มจะทำให้การเสริมแรงจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าในทิศทางหนึ่งๆ แต่มีข้อได้เปรียบในด้านการผลิตที่ง่ายกว่าทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง

2.5.2 ข้อดีของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

1.ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Nontoxic) การนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นวัสดุผสมในปูนซีเมนต์มีข้อได้เปรียบในด้านความปลอดภัยกว่าซีเมนต์ผสมแร่ใยหินในยุคปัจจุบันที่เป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจเมื่อมีอายุการใช้งานนาน ๆ

2.ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติมีราคาที่ถูกเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติหาได้ง่าย ราคาถูก อาจเป็นของเสียทางการเกษตรกรรมที่มีจำนวนมาก

3.ความเป็นฉนวนของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติจะมีลักษณะที่ประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ จำนวนมากประกอบกัน อาจเป็นเส้นใยที่มีลักษณะกลวง เป็นโพรงอากาศ ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะช่วยให้ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติมีความเป็นฉนวนมากขึ้น

4.ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ การผสมเส้นใยธรรมชาติจะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) การดัดโค้ง (Flexural strength) รวมถึงความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact strength) ทำให้วัสดุนั้นดูดซับพลังงานได้มากขึ้นส่งผลทำให้วัสดุมีความเหนียว (Toughness)

5.ความสามารถลดรอยแตกร้าว (Crack arresting mechanism) เมื่อซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาตินั้นได้รับแรงกระทำนั้นจะเริ่มมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นหน้าที่หลักของเส้นใยคือการยับยั้งการเติบโตของรอยแตกร้าวได้ดีกว่าซีเมนต์เพลสปกติ

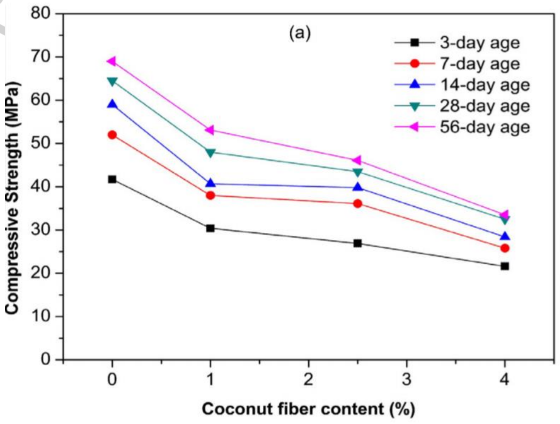
6.มีน้ำหนักที่เบาและความหนาแน่นของวัสดุที่ลดลง การผสมเส้นใยธรรมชาติลงในซีเมนต์จะช่วยลดน้ำหนักของวัสดุลงได้ และมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงเนื่องจากเส้นใยมีน้ำหนักที่เบา

มหาวิทยาลัยศิลปากร

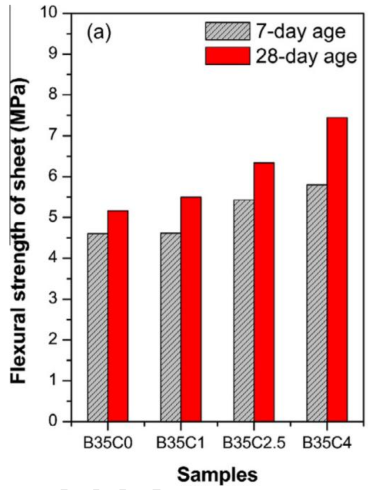
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Asasutjarit และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาผลของความยาวของเส้นใยมะพร้าว การปรับปรุงผิวเส้นใยและอัตราส่วนผสมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนของซีเมนต์คอมโพสิตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 1-6, 1-13 และ 1-3 เซนติเมตร ที่มีการล้าง และต้ม 2 ชั่วโมง มีอัตราส่วนซีเมนต์ : เส้นใยมะพร้าว : น้ำ เท่ากับ 1:1:1, 1:2:1 และ 2:1:2 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ลดลง และเส้นใยมะพร้าวที่มีความยาวมากกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และค่าความหนาแน่น (Density) ที่ต่ำกว่าเส้นใยมะพร้าวที่มีขนาดสั้น แต่เส้นใยมะพร้าวที่ยาวจะมีค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ที่สูงกว่าเส้นใยสั้น โดยผู้วิจัยสรุปว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ซีเมนต์:เส้นใยมะพร้าว:น้ำ ในอัตราส่วน 2:1:2 ที่ความยาวเส้นใยมะพร้าว 1-6 เซนติเมตร

Hwang และคณะ [37] ได้ศึกษาการใช้เส้นใยมะพร้าวขนาดสั้นแบบสุ่มเพื่อสร้างวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเพื่อตรวจสอบสมบัติเชิงกล โดยใช้เส้นใยมะพร้าวขนาดเฉลี่ย 17 มิลลิเมตร อัตราส่วน Aspect ratio (L/D) 40 ถูกล้าง และต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในการผสมจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 0.35 ทราย 15 % และ GBFS 25% โดยน้ำหนักซีเมนต์ และใช้ FA แทนที่ทราย 15% จากนั้นผสมเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการล้างและต้มในอัตราส่วน 0, 1, 2.5 และ 4% โดยปริมาตรของซีเมนต์ และบ่มเป็นเวลา 3, 7, 14, 28 และ 56 วัน จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าวจะส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงกด (Compressive strength) ของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตลดลงแต่ค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) เพิ่มขึ้น

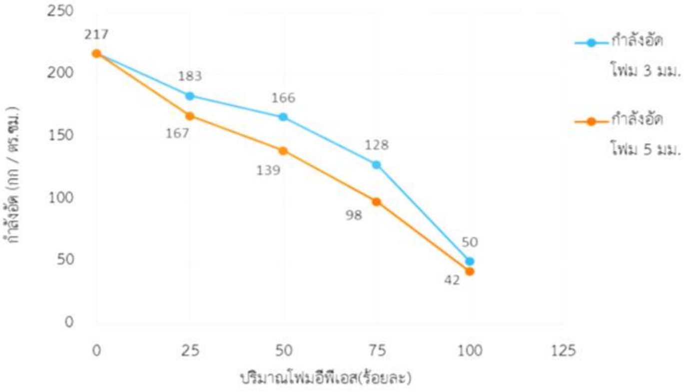


รูปที่ 17 Compressive strength ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์และเส้นใยมะพร้าวที่เวลาบ่ม 5, 7, 14, 28 และ 56 วัน [37]



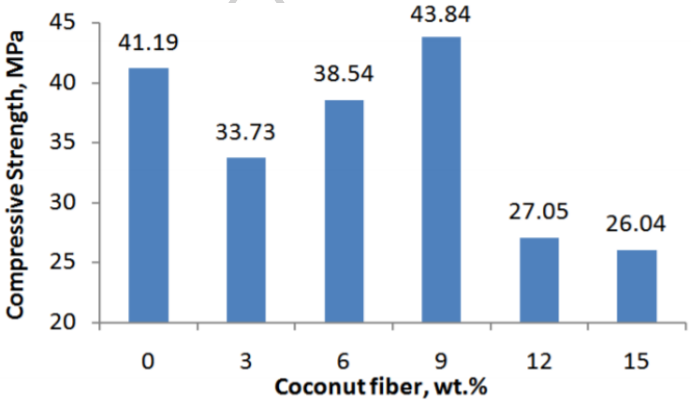
รูปที่ 18 Flexural strength ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์และเส้นใยมะพร้าวที่เวลาบ่ม 7 และ 28 วัน [37]

Sukanya [38] ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของจากโฟม Expanded polystyrene foam (EPS) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้โฟมขนาด 3 และ 5 มิลลิเมตร แทนที่ทราย 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตรของทราย โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:1.75 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) 0.35 ทำการบ่ม 28 วัน ทำการหล่อในแบบหล่อคอนกรีตขนาด 15 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร x15 เซนติเมตร แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือการใช้โฟมแทนที่ทรายร้อยละ 75 โดยปริมาตร โดยโฟมขนาด 3 และ 5 มิลลิเมตรจะมี Compressive strength ที่การบ่ม 28 วันเท่ากับ 128 และ 98 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีน้ำหนักที่เบากว่าคอนกรีตธรรมดา 59 และ 55 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

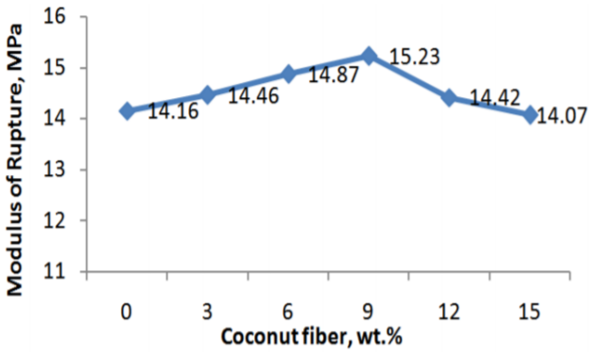


รูปที่ 19 Compressive strength ที่เวลาบ่ม 28 วันของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์กับโฟมขนาด 3 และ 5 มิลลิเมตร [38]

Abdullah และคณะ [39] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมปริมาณเส้นใยมะพร้าวลงในซีเมนต์ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล โดยในงานจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 และอัตราส่วนปริมาณน้ำต่ออัตราส่วนซีเมนต์ 0.55 และใช้เส้นใยมะพร้าวความยาวแบบสุ่มที่ปริมาณ 3, 6, 9, 12 และ 15 % โดยน้ำหนักแทนที่ทราย จากนั้นบ่มเป็นเวลา 28 วัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าวจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง และพบว่าค่า Compressive strength และโมดูรัสการแตกร้าว (Modulus of rupture) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ทรายด้วยเส้นใยมะพร้าว 3 - 9% และเริ่มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 20 Compressive strength ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 % โดยน้ำหนักที่เวลาบ่ม 28 วัน [39]

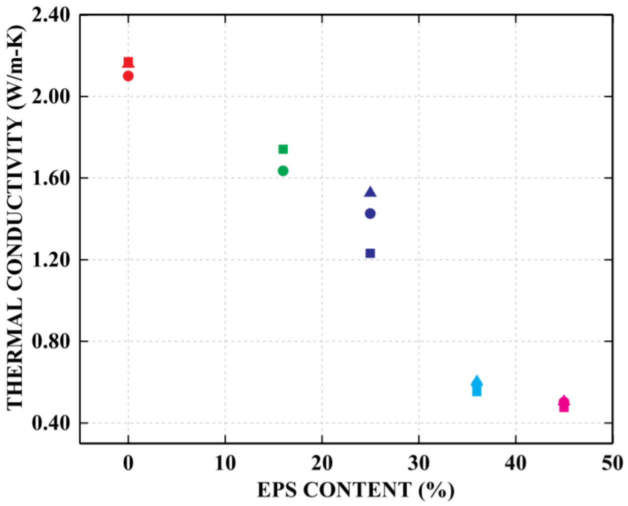


รูปที่ 21 Modulus of rupture ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 0, 3, 6, 9, 12 และ15 % โดยน้ำหนัก ที่เวลาบ่ม 28 วัน [39]

Kamarulzaman และคณะ[40] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีส่วนผสมของ Expanded polystyrene beads (EPS) แทนที่ทรายในอัตราส่วน 0, 20, 30, 40 และ 50 %โดยปริมาตรทราย โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:3 โฟม EPS ขนาด 1.18 -2.36 มิลลิเมตร ทรายขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 และมีการผสม Superplasticizer (ESTOP) 8 มิลลิลิตรต่อปูนซีเมนต์ 1 กิโลกรัม ในการสร้างชิ้นงานขนาด 215 มิลลิเมตร × 102.5 มิลลิเมตร × 65 มิลลิเมตร และบ่มเป็นเวลา 28 วัน พบว่าเมื่อปริมาณโฟม EPS แทนที่ทรายมากขึ้นจะทำให้ค่า Compressive strength และค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) มีค่าต่ำลง

คงสมศักดิ์ศิริ[41] ได้ทำการศึกษาการนำขยะโฟมเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการนำมาผสมคอนกรีตแทนที่มวลละเอียดในการสร้างคอนกรีตบล็อกประดับ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค้างเบอร์ 200 โฟมบดย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 8 โดยพิจารณาอัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : โฟม ในอัตราส่วนที่ต่างกัน คือ 1:0.5:3, 1:0.5:4, 1:0.5:5, 1:0.5:6, 1:1:3, 1:1:4, 1:1:5 และ 1:1:6 โดยปริมาตร และอัตราสวนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยปริมาตร พบว่าเมื่ออัตราส่วนของโฟมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น (Density) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และ Compressive strength ลดลง ทางผู้วิจัยได้อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ ปูนซีเมนต์:ทราย:โฟม เทากับ1:0.5:4 โดยปริมาตร อัตราส่วนต่อปูนซีเมนต 0.5 ที่ 28 วันมีความหนาแน่นเท่ากับ 1090.98 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.97 กำลังอัด 33.02 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Dixit และคณะ [42] ทำการศึกษาซีเมนต์คอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบาและมีความเป็นฉนวนทางความร้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเม็ด Expanded polystyrene (EPS) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3-5 มิลลิเมตรโดยใช้สัดส่วนโฟม EPS ในการแทนที่ ปูนซีเมนต์, Silica fume, Silica sand และ Quartz powder ในอัตราส่วนผสม 0, 16, 25, 36 และ 45% โดยปริมาตรส่วนผสมแห้งที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.22 และ Superplasticizer (Flow mix 3000U) ต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.03 ที่การบ่ม 28 วัน พบว่าเมื่อปริมาณโฟมในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Compressive strength, Modulus of elasticity และ Thermal conductivity มีค่าลดลง



รูปที่ 22 ค่า Thermal conductivity และปริมาณ EPS ในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต [42]

Ramakrishna และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ มอร์ต้า (อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อทราย 1:3) กับเส้นใยมะพร้าว ป่านศรนารายณ์ ปอกระเจา ในอัตราส่วน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.5 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และความยาวของเส้นใย 2, 3 และ4 เซนติเมตร อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.47 พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าแผ่นเรียบที่ผสมเส้นใยมะพร้าวความยาวเส้นเท่ากับ 4 เซนติเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 2% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์สามารถรับแรงกระแทกได้สูงสุด (253.5 จูล) เมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดอื่น ๆ

Sakool [44] ได้ทำการศึกษาซีเมนต์เสริมเส้นใยมะพร้าวที่มีขนาด 3, 6 และ 12 เซนติเมตร ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 บ่มในน้ำ 7 วัน พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวลงในแผ่นซีเมนต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบซีเมนต์ปกติแต่ความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ขยะโฟม Expanded polystyrene foam (EPS)

3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตาม มอก.15 เล่ม 1 - 2555

3.1.3 เส้นใยมะพร้าว

3.1.4 น้ำสะอาด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.1 แบบหล่ออะคริลิค (Acrylic mold)

3.2.2 เกียงฉาบปูน

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance)

3.2.4 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve shaker)

3.2.5 ตู้อบควบคุมอุณภูมิ (Oven)

3.2.6 เครื่องปั่น (Blender)

3.2.7 นาฬิกาจับเวลา

3.2.8 เวอร์เนียร์

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) บริษัท Hitachi รุ่น TM3030

3.3.2 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลแบบทั่วไป Universal testing machine รุ่น 5969

3.3.3 เครื่อง Limited Oxygen Index Tester (LOI)

3.3.4 เครื่อง Instron CEAST 9050 impact pendulum machine

3.3.5 เครื่อง Density kit (Mettler toledo)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.4 แนวคิดของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์น้ำหนักเบาที่มีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ขยะโฟม EPS และเส้นใยมะพร้าว โดยคาดหวังว่าแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เตรียมได้จะมีน้ำหนักเบา มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ สามารถทนรับแรงกระแทกได้ดี มีราคาถูก สามารถลดปริมาณขยะโฟม และขยะทางการเกษตรลง สามารถทดแทนซีเมนต์บอร์ดที่ทำจากแร่ใยหิน และสามารถเพิ่มมูลค่าขยะพลาสติกและชีวมวลได้

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 ค้นคว้าและศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.5.2 ออกแบบและวางแผนวิธีการดำเนินงาน

3.5.3 ดำเนินงานวิจัย

3.6 การเตรียมและวิเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

<u>การเตรียมเส้นใยมะพร้าว</u>

นำเส้นใยมะพร้าวมาล้างทำความสะอาดจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และตัดให้มีขนาด 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร

รูปที่ 23 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว

<u>การเตรียมเม็ดโฟมจากขยะโฟม</u>

นำขยะโฟมมาหั่นให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ปั่นด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็วรอบ 28000 รอบต่อนาที จากนั้นคัดแยกขนาดด้วย Sieve shaker ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2000 μm

รูปที่ 24 ขยะโฟม EPS

3.6.1 การพิจารณาองค์ประกอบสารเคมีและปริมาณของเส้นใยมะพร้าวด้วยมาตรฐานการทดสอบ Technical association of pulp and paper industry (TAPPI test method)

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของสารในเส้นใยมะพร้าวตามมาตรฐานการทดสอบ TAPPI ได้แก่ การสกัดสารแทรก (TAPPI T264), ค่าการละลายในตัวทำละลายเอทานอล-เบนซีน (TAPPI T204), ปริมาณลิกนิน (TAPPI T222), ปริมาณโฮโมเซลลูโลสโดยวิธี Acid chlorite ด้วยวิธี Browing, ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (TAPPI T203) และปริมาณเถ้า (TAPPI T211) โดยขั้นตอนการทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของสารในเส้นใยมะพร้าว [28] สามารถปฏิบัติได้ดังนี้

- การเตรียมตัวอย่างที่ปราศจากสารแทรกตาม TAPPI T264 om-88 มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้
    1. ตั้งเครื่องมือสกัดสารแทรกโดยใช้เครื่อง Soxhlet extraction
    2. ชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม ซึ่งมีขนาด 40 mesh ด้วยสารละลายผสมของเอทานอล - เบนซิน (1 : 2 โดยปริมาตร) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 6 - 8 ชั่วโมง
    3. นำไปสกัดใหม่โดยสกัดด้วย 95% เอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
    4. กรองตัวอย่างผ่าน Buchner funnel และล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดเอทานอลส่วนเกิน
    5. เทตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จากนั้นต้มให้เดือดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้แห้ง แล้วกรองผ่าน Buchner funnel และล้างด้วยน้ำกลั่นที่ต้มเดือด จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ

6. ผสมและเก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่มิดชิด หาค่าปริมาณความชื้น (Moisture content) และนำตัวอย่างที่เตรียมได้นี้ไปใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่าง ๆ ทางเคมี

- การหาปริมาณสารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เอทานอล - เบนซีน วิเคราะห์ตาม TAPPI T204 om-88 มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างหนักประมาณ 3 กรัม แล้วใส่ลงไปใน Extraction thimble
2. ตวงสารละลายผสมของเอทานอลกับเบนซีน (อัตราส่วน 1 : 2 โดยปริมาตร) จำนวน 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นจัดชุดสกัด Soxhlet apparatus ควบคุมอุณหภูมิและจุดเดือดของตัวทำละลาย และใช้เวลาสกัดประมาณ 4 - 5 ชั่วโมง
3. นำสารละลายที่ได้จากการสกัดไประเหย ให้เหลือปริมาตรประมาณ 20 - 25 มิลลิลิตร โดยเครื่อง Rotary evaporator แล้วเทใส่บีกเกอร์ ที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำเข้าไประเหยในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 ± 5 °C จากนั้นทำให้เย็นลงใน Dessicator แล้วชั่งน้ำหนักของสารที่เหลือรวมกับน้ำหนักของบีกเกอร์
4. ทำ Blank โดยการนำตัวทำละลายเอทานอล - เบนซีน 200 มิลลิลิตร ไประเหยให้แห้งโดยทำการทดลองต่าง ๆ เหมือนกับการทดลองข้อ 3
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์สารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายจากสูตร

$$\text{สารแทรก} = [(W_e - W_b)/W_p] \times 100$$

เมื่อ W_e คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของสารที่ถูกสกัด

W_b คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของ blank

W_p คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของตัวอย่างที่ใช้ทดลอง

- มาตรฐานการหาปริมาณลิกนินตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-88 มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักแห้งที่ปราศจากสารแทรกหนัก 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

2. วางบีกเกอร์ลงในอ่างน้ำแข็งแล้วค่อย ๆ เติม 72% H_2SO_4 ที่แช่เย็นไว้ในตู้เย็นลงไป 15 มิลลิลิตร พร้อมคนอย่างสม่ำเสมอ ทุกๆ 15 นาที เพื่อให้ผสมกันดีขึ้น
3. ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา แล้วนำออกจากอ่างน้ำแข็งมาตั้งทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่ 20 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง พร้อมคนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ ทุก ๆ 15 นาที
4. เติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเทสารละลายในบีกเกอร์ลงไปในขวดก้นกลม พร้อมทั้งเติมนน้ำกลั่นลงไปอีกจนถึงระดับ 575 มิลลิลิตร ที่ขีดไว้ข้างขวดก้นกลม
5. ทำการ Reflux สารละลายนาน 4 ชั่วโมง เมื่อเสร็จเทสารละลายทั้งหมดใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้ 1 คืน
6. กรองผ่าน Sinter glass crucible เบอร์ 3 ที่ทราบน้ำหนักแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนแล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทำให้เย็นลงใน Dessicater หลังจากนั้นจึงชั่งน้ำหนักรวมของ Glass crucible และลิกนิน
7. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ลิกนินจาก

$$\% \text{ ลิกนิน} = A \times 100/W$$

เมื่อ A = น้ำหนักของลิกนินเป็นกรัม

W = น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของสารตัวอย่าง

- การหาปริมาณโฮโลเซลลูโลสโดย Acid chlorite ผ่านวิธีของ Browing สามารถดำเนินการได้ดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักแห้งตัวอย่างที่ปราศจากสารแทรก 3 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 160 มิลลิลิตร, กรดอะซิติก 0.5 มิลลิลิตร และโซเดียมคลอไรต์ 1.5 กรัม ตามลำดับ ลงในขวดก้นกลมและทำการทดลองในตู้ควัน
3. นำขวดก้นกลมไปตั้งในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70 - 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยเขย่าขวดอย่างสม่ำเสมอ

4. หลังจากครบ 1 ชั่วโมง เติมกรดอะซิติก 0.5 มิลลิลิตร ตามด้วย โซเดียมคลอไรต์ 1.5 กรัม ลงในสารละลายที่ยังร้อนอยู่แล้วเขย่าขวด
5. หลังจากครบ 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ให้ปฏิบัติตามข้อ 4 เมื่อครบ 1 ชั่วโมง
6. นำขวดก้นกลมวางในอ่างน้ำแข็งจนกระทั่งสารละลายในขวดมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 ℃ แล้วนำสารละลายมากรองผ่าน Sinter glass crucible เบอร์ 3 ล้างด้วยน้ำเย็นและอะซีโตน หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 ℃ หลังจากอบแล้วนำมาชั่งน้ำหนักและเก็บตัวอย่างไว้วิเคราะห์หาปริมาณแอลฟาเซลลูโลสต่อไป
7. คำนวณหาปริมาณโฮโลเซลลูโลส

% โฮโลเซลลูโลส = (น้ำหนักแห้งของโฮโลเซลลูโลสหลังการอบ/น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) X 100

- การหาปริมาณแอลฟาเซลลูโลสตามมาตรฐาน TAPPI T203 om-88 มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างจากการวิเคราะห์ % โฮโลเซลลูโลสประมาณ 1.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ลงไป แล้วปรับอุณหภูมิของสารละลายที่ 2.5 ± 0.2 ℃
2. คนสารละลายด้วยเครื่องกวนจนกระทั่งเกิดการกระจายอย่างสมบูรณ์
3. ล้างเครื่องกวนด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร (ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 100 มิลลิลิตร) คนสารละลายด้วยแท่งแก้วนำไปแช่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 2.5 ± 0.2℃ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วคนด้วยแท่งแก้ว ทิ้งไว้อีก 30 นาที

8. กรองสารละลายโดยใช้ Sinter glass crucible เบอร์ 3 แล้วล้างเยื่อที่เหลือด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเป็นกลางและ 10% กรดอะซิติก ปริมาตร 40 มิลลิลิตร นำไปอบแห้งที่ 105 ℃ ในเตาอบ
9. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสจาก
10. % แอลฟาเซลลูโลส = (น้ำหนักแอลฟาเซลลูโลส/น้ำหนักตัวอย่าง) X 100

3.6.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

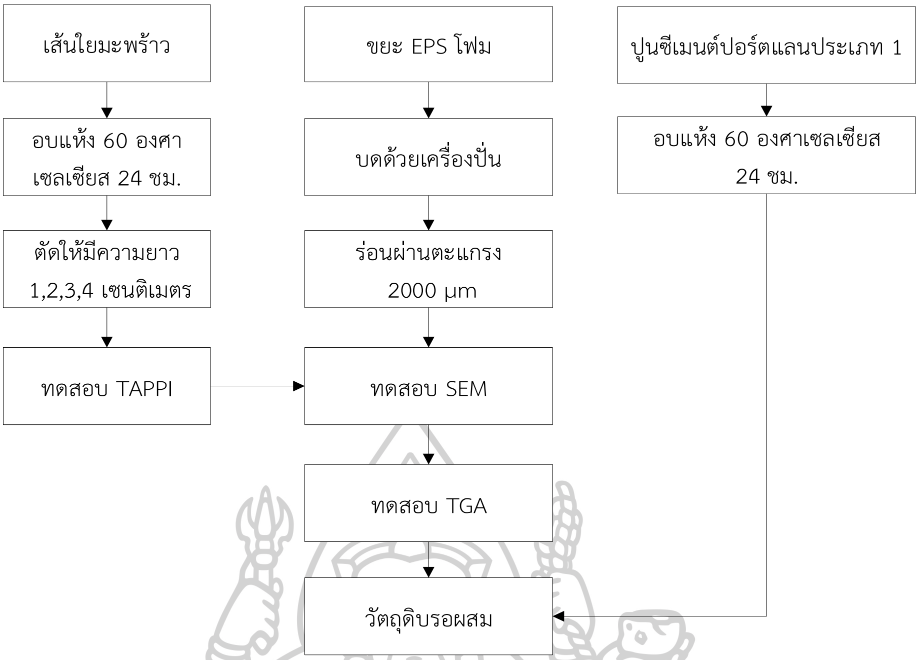
เริ่มจากการเตรียมเส้นใยมะพร้าวที่ตัดแล้ว และขยะโฟมจำนวนหนึ่งจากนั้นเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองแล้วจึงถ่ายภาพขยายกำลังสูงจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อสังเกตลักษณะรูปร่างเส้นใย ลักษณะพื้นผิว เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมะพร้าว และพื้นผิวของขยะโฟม

รูปที่ 25 เครื่อง Scanning electron microscope (Hitachi TM3030)

3.6.3 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyser (TGA)

ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นใยมะพร้าว และขยะโฟมโดยทดสอบภายใต้สภาวะอากาศที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

รูปที่ 26 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (Mettler toledo)



รูปที่ 27 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในงานวิจัย

3.7 การขึ้นรูปซีเมนต์คอมโพสิต

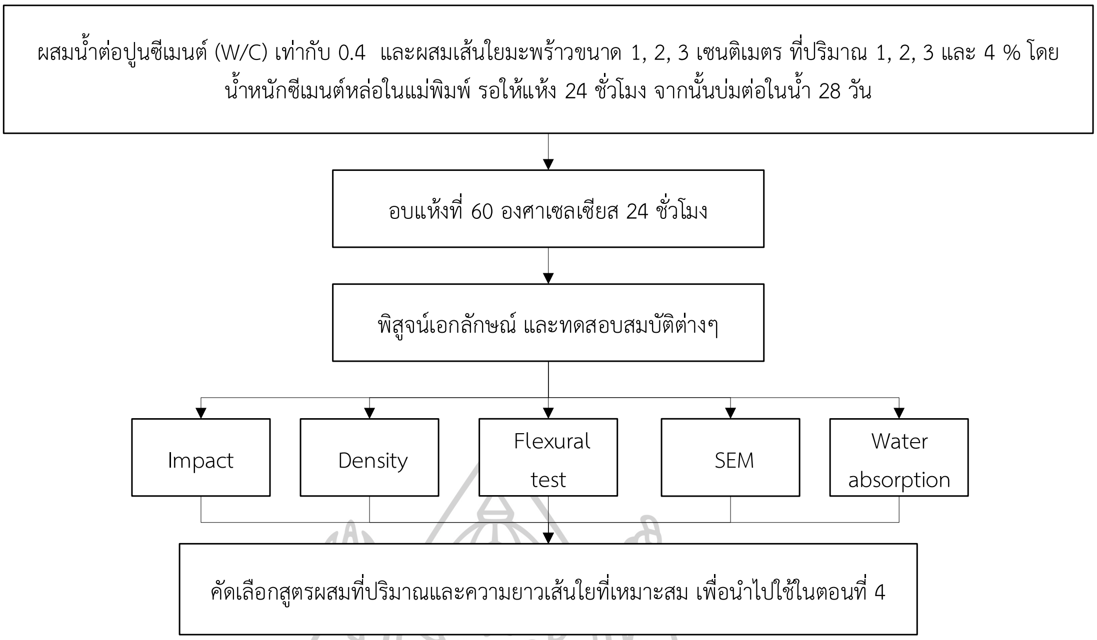
3.7.1 ตอนที่ 1 การศึกษาผลของขนาด และปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติของซีเมนต์คอมโพสิต

ผสมน้ำต่อปูนเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.4 และเส้นใยมะพร้าวยาว 1, 2, และ 3 เซนติเมตร ที่ 1, 2, 3 และ 4 % โดยน้ำหนักซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 7 ผสมให้เข้ากันในบีกเกอร์ดังแสดงในรูปที่ 29 แล้วเทลงในแม่พิมพ์ Acrylic ขนาด 5 cm x 12 cm x 0.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 30 ที่มีกระดาษรองด้านในแม่พิมพ์จากนั้นประกบอัดด้วยฝาแม่พิมพ์ เป็นเวลา 15 นาทีดังแสดงในรูปที่ 31 แล้วนำออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นรอให้แห้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มต่อในน้ำ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 32 จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) และทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความสามารถการดัดโค้ง (Flexural test) ทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact test) ความหนาแน่น (Density) สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมไปใช้ในตอนที่ 4

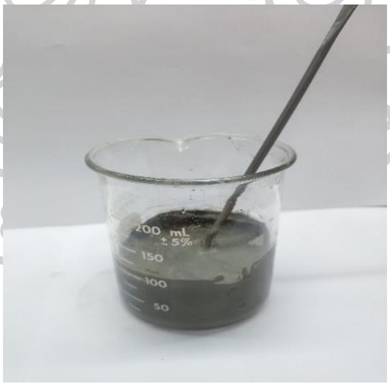
ตารางที่ 7 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าว

สูตรปูนซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าว	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)	เส้นใยมะพร้าว	
		ความยาว (เซนติเมตร)	ปริมาณ (% โดยน้ำหนักซีเมนต์)
Cement	0.4	-	-
M11	0.4	1	1
M12	0.4	1	2
M13	0.4	1	3
M14	0.4	1	4
M21	0.4	2	1
M22	0.4	2	2
M23	0.4	2	3
M24	0.4	2	4
M31	0.4	3	1
M32	0.4	3	2
M33	0.4	3	3
M34	0.4	3	4
M41	0.4	4	1
M42	0.4	4	2
M43	0.4	4	3
M44	0.4	4	4

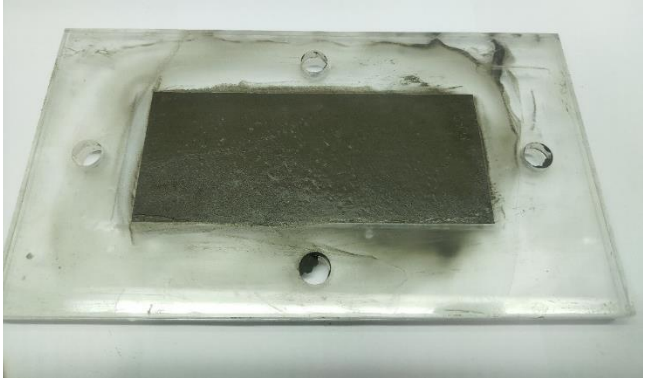
* M คือ ซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่าง ๆ



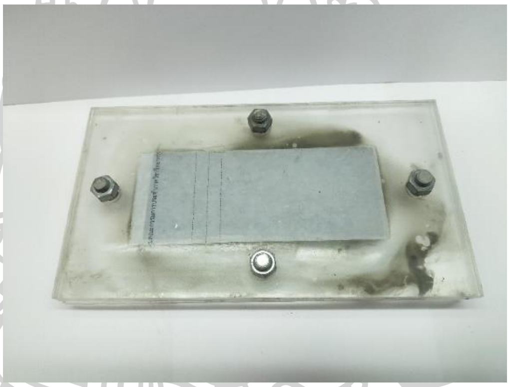
รูปที่ 28 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของขนาด และปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์



รูปที่ 29 การผสมสารตัวอย่าง (ซีเมนต์, น้ำ, เส้นใยมะพร้าวหรือขยะโฟม) โดยกวนให้เข้ากันในบีกเกอร์เป็นเวลา 5 นาที

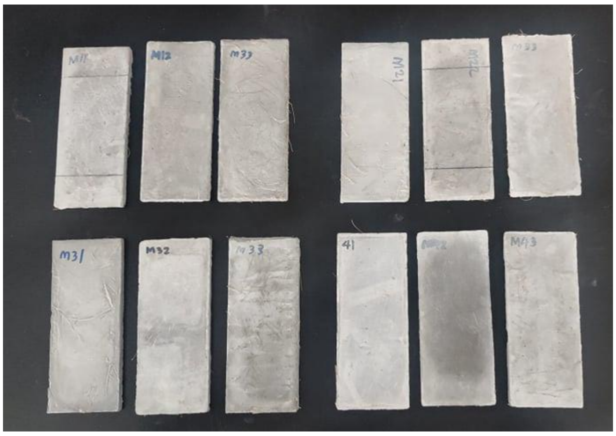


รูปที่ 30 การนำสารผสมในรูปที่ 29 มาเทลงในแม่พิมพ์ขนาด 5 x 12 x 0.5 cm^3



รูปที่ 31 ทำการถอดชิ้นงานตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์จะได้ชิ้นงานที่มีขนาด 5 x 12 x 0.5 cm^3

รูปที่ 32 นำชิ้นงานตัวอย่างจากรูปที่ 31 มาจุ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อทำการบ่ม



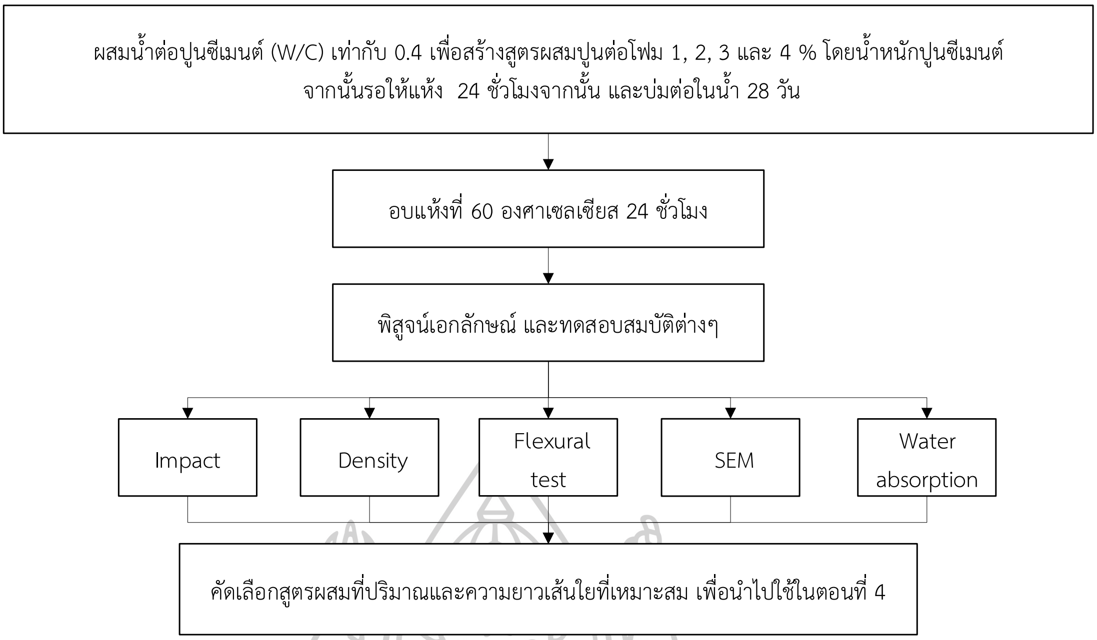
รูปที่ 33 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วันสำหรับการศึกษาผลของขนาด และปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่ส่งผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต

3.7.2 ตอนที่ 2 การศึกษาผลของปริมาณขยะโฟมที่มีต่อสมบัติวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต

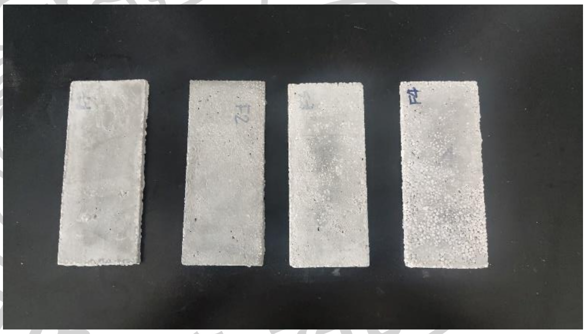
ผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสูตรผสมปูนซีเมนต์กับขยะโฟมที่ 0, 1, 2, 3 และ 4 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ดังตารางที่ 8 ผสมให้เข้ากันในบีกเกอร์แล้วเทลงในแม่พิมพ์ Acrylic ขนาด 5 cm x 12 cm x 0.5 cm ที่มีกระดาษรองด้านในแม่พิมพ์จากนั้นประกบอัดด้วยฝาแม่พิมพ์เป็นเวลา 15 นาทีแล้วนำออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นรอให้แห้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มต่อในน้ำ 28 วัน จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) และทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความสามารถการดัดโค้ง (Flexural test) ทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact test) ความหนาแน่น (Density) สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมไปใช้ในตอนที่ 4

ตารางที่ 8 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์กับขยะโฟม

สูตรผสมปูนซีเมนต์กับขยะโฟม	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)	ขยะโฟม (% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์)
Cement	0.4	0
F1	0.4	1
F2	0.4	2
F3	0.4	3
F4	0.4	4



รูปที่ 34 ขั้นตอนการศึกษาผลของขนาด และปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่ส่งผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต



รูปที่ 35 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน สำหรับการศึกษาผลของปริมาณขยะโฟมที่ส่งผลต่อสมบัติวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต

3.7.3 ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต

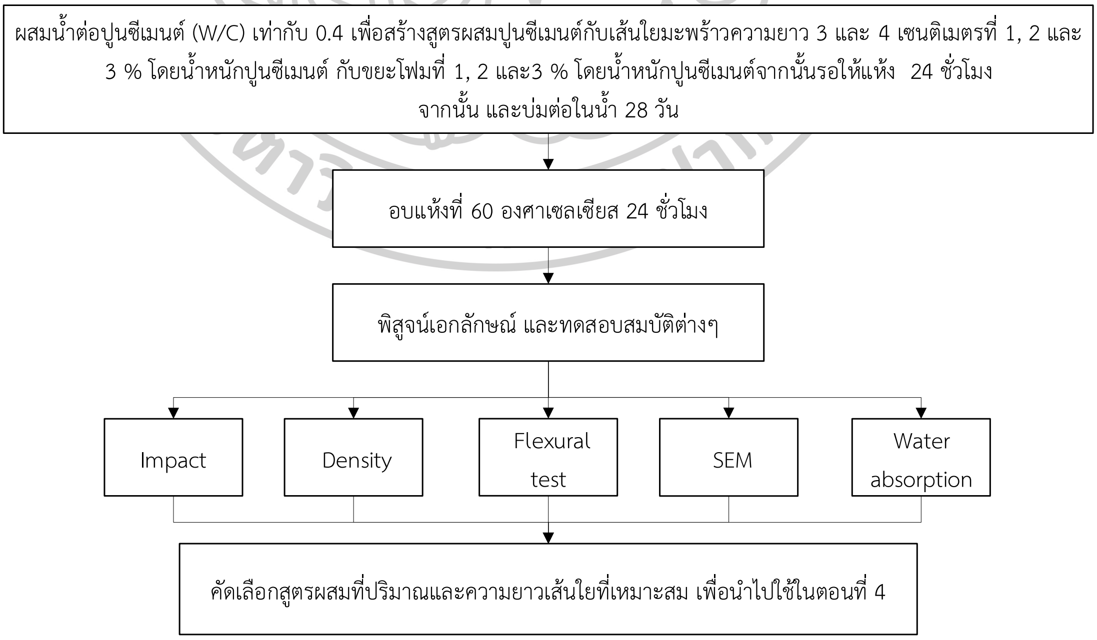
ผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.4 เพื่อสร้างสูตรผสมปูนซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าวความยาว 3 และ 4 เซนติเมตรที่1, 2 และ 3 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ กับขยะโฟมที่ 1, 2 และ 3 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 9 ผสมให้เข้ากันในบีกเกอร์แล้วเทลงในแม่พิมพ์ Acrylic ขนาด 5 cm x 12 cm x 0.5 cm ที่มีกระดาษรองด้านในแม่พิมพ์จากนั้นประกบอัดด้วยฝาแม่พิมพ์

เป็นเวลา 15 นาทีแล้วนำออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นรอให้แห้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มต่อในน้ำ 28 วัน จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) และทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความสามารถการดัดโค้ง (Flexural test) ทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact test) ความหนาแน่น (Density) สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมไปใช้ในตอนที่ 4

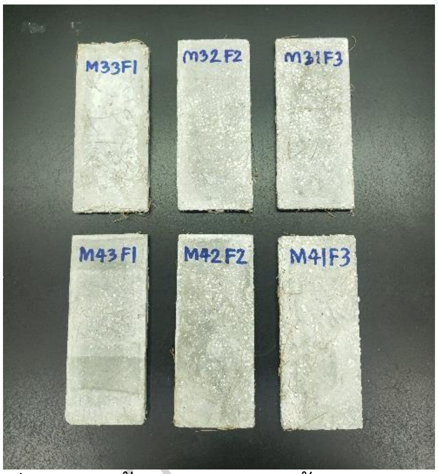
ตารางที่ 9 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

สูตรผสมปูนซีเมนต์กับเส้นใยมะพร้าว และขยะโฟม	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)	เส้นใยมะพร้าว		ขยะโฟม % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์
		ความยาว (cm)	ปริมาณ (%)	
M33F1	0.4	3	3	1
M32F2	0.4	3	2	2
M31F3	0.4	3	1	3
M43F1	0.4	4	3	1
M42F2	0.4	4	2	2
M41F3	0.4	4	1	3

* M คือ ความยาว และปริมาณเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่าง ๆ, F คือ ปริมาณขยะโฟมในอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 36 การผสมปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวมีผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต



รูปที่ 37 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน สำหรับการศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวมีผลต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต

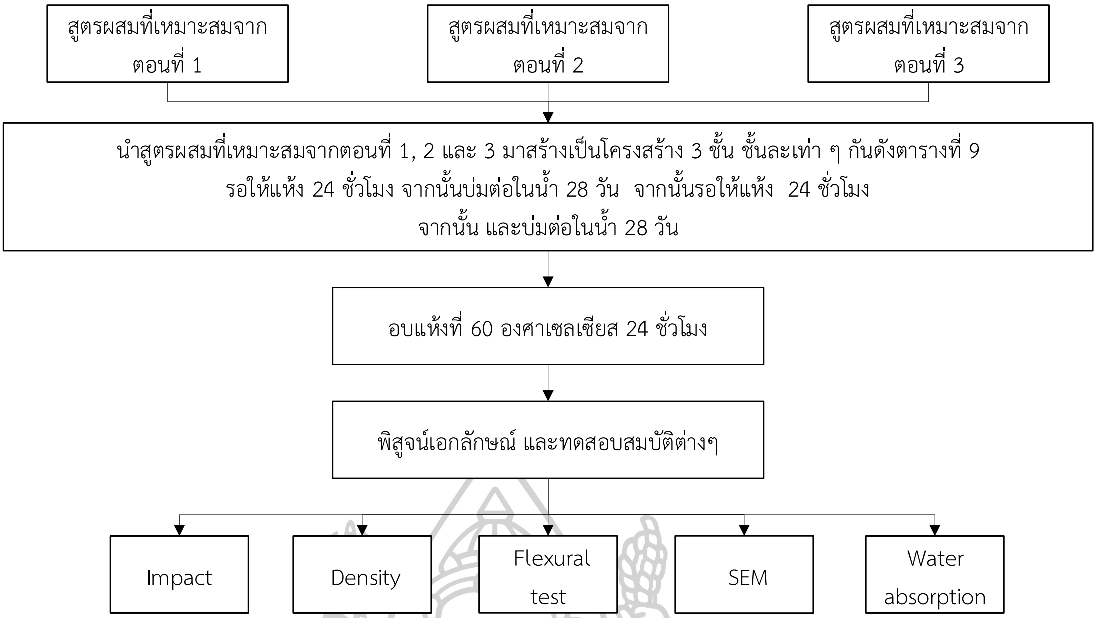
3.7.4 ตอนที่ 4 ศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

ศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว โดยเลือกสูตรผสมที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 2 และ 3 เพื่อสร้างเป็นโครงสร้าง 3 ชั้น ชั้นละเท่าๆ กันโดยมีอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 10 ผสมให้เข้ากันในบีกเกอร์แล้วเทลงในแม่พิมพ์ Acrylic ขนาด 5 cm x 16 cm x 8.5 cm ที่มีกระดาษรองด้านในแม่พิมพ์จากนั้นประกบอัดด้วยฝาแม่พิมพ์เป็นเวลา 15 นาทีแล้วนำออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นรอให้แห้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มต่อในน้ำ 28 วัน จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) และทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความสามารถการดัดโค้ง (Flexural test) ทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact test) ความหนาแน่น (Density) สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ตารางที่ 10 สูตรโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

สูตรโครงสร้างแซนด์วิช	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
Cement	Cement	Cement	Cement
M34(F1)M34	M34	F1	M34
M34(F2)M34	M34	F2	M34
M34(M33F1)M34	M34	M33F1	M34
M34(M33F1)M34	M34	M32F2	M34

*M คือสูตรผสมปูนซีเมนต์ และเส้นใยมะพร้าวที่ขนาด และปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1,
F คือสูตรผสมปูนซีเมนต์ต่อโฟมที่เหมาะสมจากตอนที่ 2 และ M_ _F_คือสูตรที่เหมาะสมจากตอนที่ 3



รูปที่ 38 ขั้นตอนศึกษาผลของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวต่อสมบัติของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต

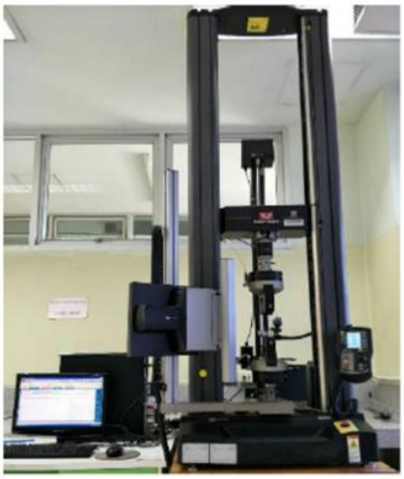
รูปที่ 39 ตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมแบบโครงสร้างแซนด์วิช

3.8 การทดสอบและวิเคราะห์

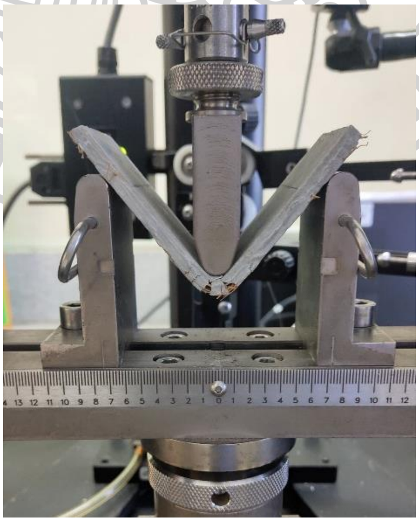
3.8.1 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test)

การทดสอบความต้านแรงดัดโค้งของปูนซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าวจากตอนที่ 1 ปูนซีเมนต์ผสมขยะโฟมจากตอนที่ 2, ปูนซีเมนต์ผสมขยะโฟมกับเส้นใยมะพร้าวจากตอนที่ 3 และโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตจากตอนที่ 4 ด้วยมาตราฐาน BS EN 12467: 2012 (Fiber-cement flat

sheets-product specification and test methods) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (UTM) ที่อัตราเร็ว 2 มิลลิเมตร/นาที และใช้ load cell ขนาด 50 กิโลนิวตัน ทำการบันทึกค่าและหาค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานที่มีค่าทดสอบใกล้เคียงกันมากที่สุดอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน



รูปที่ 40 เครื่อง Universal testing machine รุ่น Instron 5965



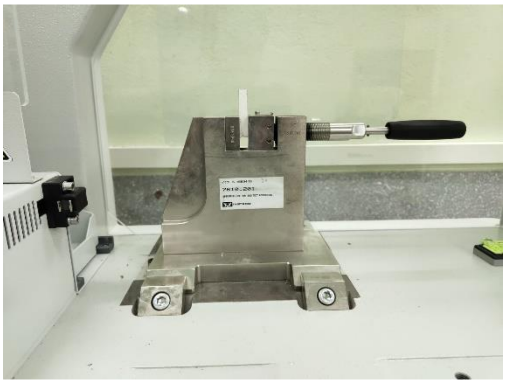
รูปที่ 41 การทดสอบ Flexural แบบ 3 point bending test ของซีเมนต์คอมโพสิต

รูปที่ 42 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการทดสอบ Flexural (M34)

3.8.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบแรงกระแทก แบบ Izod impact ของปูนซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าวจากตอนที่ 1 ปูนซีเมนต์ผสมขยะโฟมจากตอนที่ 2 และปูนซีเมนต์ผสมขยะโฟมกับเส้นใยมะพร้าวจากตอนที่ 3 และโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตจากตอนที่ 4 โดยใช้เครื่อง Instron ceast 9050 impact pendulum machine โดยใช้ชิ้นงานขนาด 1 cm x 5 cm x 0.5 cm ขนาดตุ้มน้ำหนัก 1 J ใช้เพื่อประเมินพฤติกรรมการได้รับกระแทกของชิ้นงานทำการบันทึกค่าและหาค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานที่มีค่าทดสอบใกล้เคียงกันมากที่สุดอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน

รูปที่ 43 เครื่อง Instron ceast 9050 impact pendulum machine



รูปที่ 44 การวางชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

3.8.3 การศึกษาสมบัติการต้านทานการติดไฟ

การทดสอบการต้านทานการติดไฟของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตโดยวิธีการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ตามมาตรฐาน ASTM-D2863-91 ซึ่งวิธีการทดสอบ LOI นั้น จะปล่อยให้แก๊สผสมระหว่างแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านท่อแก้วอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจ่อไฟที่ชิ้นตัวอย่างเป็น เวลา 30 วินาที พร้อมทั้งบันทึกเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้และระยะทางที่เกิดการลุกไหม้ของชิ้นงานแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

%O_2	อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน (ลิตรต่อนาที)	เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (วินาที)
20	3.6	14.2	30
40	7.1	10.7	30
60	10.7	7.1	30
80	14.2	3.6	30
100	17.8	0.0	30

รูปที่ 45 การทดสอบ Limited oxygen index

3.8.4 การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา

การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ของชิ้นงานหลังจากการทดสอบแรงกระแทก (Impact test) จากตอนที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยของแข็งเตรียมให้มีขนาดไม่เกิน 3 เซนติเมตร จากนั้นเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทอง เพื่อสังเกตลักษณะรูปร่างเส้นใย ลักษณะพื้นผิว ลักษณะการยึดเกาะของเส้นใยมะพร้าวกับปูนซีเมนต์ ลักษณะการยึดเกาะของขยะโฟมกับปูนซีเมนต์

3.8.5 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

ชิ้นงานปูนซีเมนต์ผสมในตอนที่ 1, 2, 3 และ 4 นำมาทดสอบด้วยเครื่อง Density kit (Mettler toledo) ซึ่งติดตั้งบนเครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ

รูปที่ 46 เครื่อง Density kit (Mettler toledo)

3.8.6 การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ ของปูนซีเมนต์ผสมขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าวจากตอนที่ 1, 2, 3 และ 4 ที่ทำการบ่มในน้ำ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C-1185 โดยนำชิ้นงานเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันนำชิ้นงานขึ้นจากน้ำเช็ดด้วยผ้าแห้งแล้วชั่งน้ำหนักบันทึกผล คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำจาก

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{(W_s - W_d)}{W_d} \times 100$$

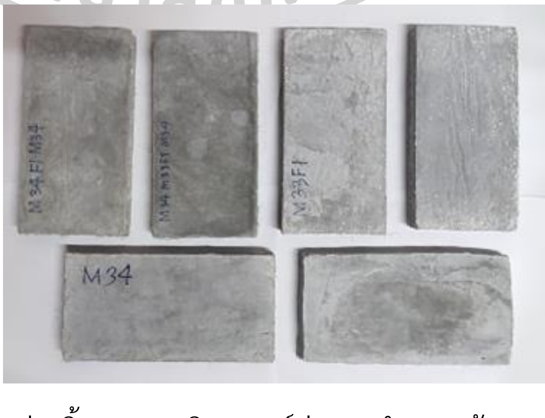
โดย W_s คือ น้ำหนักชิ้นงานที่อิ่มตัว (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักชิ้นงานเริ่มต้น (กรัม)

3.8.7 การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน (Thermal conductivity and thermal resistance)

<u>การเตรียมชิ้นงาน</u>

การขึ้นรูปชิ้นงานโดยหล่อชิ้นงานขนาด 20 cm x 10 cm x 2.5 cm ของชิ้นงานปูนซีเมนต์ที่มีสูตรผสมที่เหมาะสมในตอนที่ 1 2 3 และ 4 (Cement, M34, F1, M33F1, M34F1M34, M34M33F1M34) เทลงในแม่พิมพ์ Acrylic ขนาด 20 cm x 10 cm x 2.5 cm ที่มีกระดาษรองด้านในแม่พิมพ์จากนั้นประกบอัดด้วยฝาแม่พิมพ์เป็นเวลา 15 นาทีแล้วนำออกจากแม่พิมพ์รอให้แห้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มต่อในน้ำ 28 วัน จากนั้นทดสอบด้วยเครื่อง Thermal conductivity tester ตามมาตรฐาน ASTM C177



รูปที่ 47 ตัวอย่างชิ้นงานการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน

รูปที่ 48 เครื่อง Thermal conductivity tester รุ่น ZNCLBS1128

มหาวิทยาลัยศิลปากร

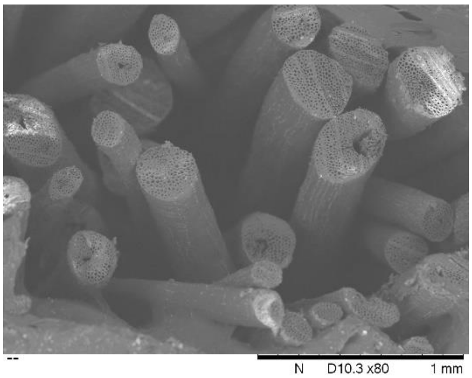
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ

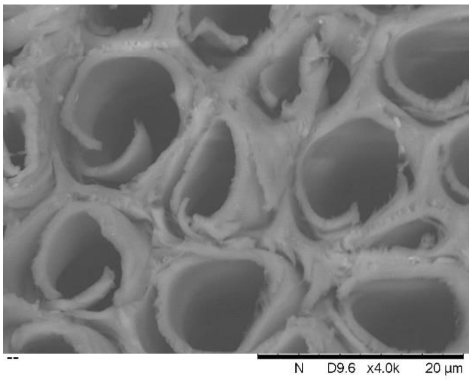
4.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใย

รูปที่ 49 ภาพถ่ายเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในการทดลอง

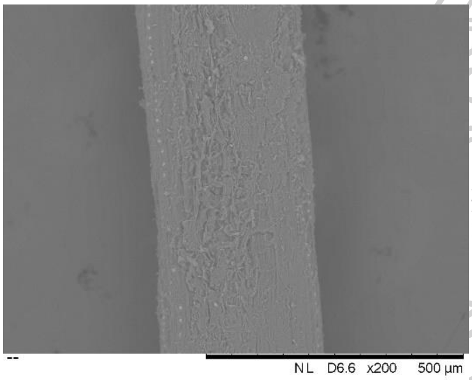
การใช้เส้นใยธรรมชาติมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นซีเมนต์คอมโพสิตโดยทั่วไปนั้นควรคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพของเส้นใย เช่น ความยาวของเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย และลักษะทางสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวเป็นต้น จากรูปที่ 49 เป็นลักษณะของเส้นใยมะพร้าวที่มองเห็นด้วยตาเปล่า พบว่าเส้นใยมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเรียวมีความยาวประมาณ 15 เซนติเมตร ผิวของเส้นใยเรียบแต่เมื่อนำเส้นใยมะพร้าวดังกล่าวมาส่องขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะทำให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวชัดเจนยิ่งขึ้นแสดงดังรูปที่ 50 (a-d) พบว่าพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวมีความขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ และมีหน้าตัดรูปร่างเป็นวงกลม การที่เส้นใยมีลักษณะขรุขระนั้นจะเพิ่มความสามารถในยึดเกาะกับปูนซีเมนต์ได้ดี ผู้วิจัยได้ใช้ Software ImageJ สำหรับหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากรูปที่ 50 (a-b) พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 225 ± 81.19 ไมโครเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำเลี้ยง (Lumen) ประมาณ 10.8 ± 2.49 ไมโครเมตร ในการศึกษานี้ได้ใช้เส้นใยมะพร้าวความยาว 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตรซึ่งคิดเป็นค่า L/D Ratio เท่ากับ 44.44, 88.89, 133.33 และ 177.78 ตามลำดับ



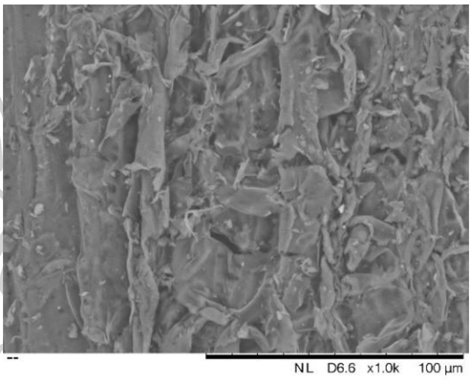
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 50 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใย
(a) ภาพตัดขวางเส้นใย (b) ภาพตัดขวางเส้นใยที่กำลังขยาย 4000x
(c) ลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่กำลังขยาย 500x (d) ลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่กำลังขยาย 1000x

4.1.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว

เนื่องจากมะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจนิยมปลูกกันมากในหลายพื้นที่ทำให้ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยแตกต่างกันไปในแต่ละท้องที่จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว (Chemical composition) ตามมาตรฐานการทดสอบ TAPPI ได้แก่ การสกัดสารแทรก (TAPPI T264), ค่าการละลายในตัวทำละลายเอทานอล-เบนซีน (TAPPI T204), ปริมาณลิกนิน (TAPPI T222), ปริมาณโฮโมเซลลูโลส, ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (TAPPI T203) โดยวิธี Acid chlorite และ Browing ซึ่งผลวิเคราะห์เป็นดังนี้

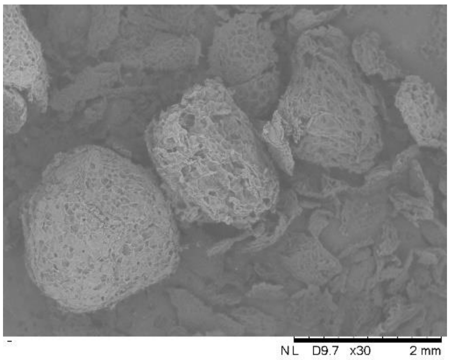
ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของสารในเส้นใยมะพร้าว

องค์ประกอบ	% Cellulose	% Hemicellulose	% Lignin
ปริมาณ	40.8	30.08	31.67

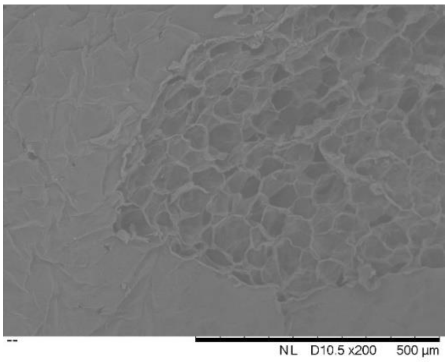
จากตารางที่ 12 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณสารในเส้นใยมะพร้าว ซึ่งพบว่ามีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดคือ 40.8% รองลงมาคือเฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีปริมาณ 30.08% และ 31.67% ตามลาดับ ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sakool [45] เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวนั้นเป็นของเสียทางเกษตรกรรมที่มีจำนวนมากจึงเหมาะสมที่ใช้เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์คอมโพสิต อีกทั้งยังมีเซลลูโลสปริมาณมากที่ประกอบด้วยโครงสร้างหมู่ไฮดรอกซิล (- OH) ถึง 3 หมู่ จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ดีกับสารประกอบซีเมนต์ ดังนั้นเส้นใยมะพร้าวมีสมบัติเป็นตัวเติมและสารเสริมแรงได้ในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตได้

4.1.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของขยะโฟม

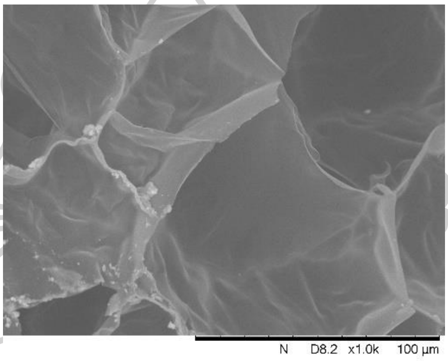
สำหรับขยะโฟมนั้นถูกบดย่อยมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม สีขาว เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าแต่เมื่อนำขยะโฟมดังกล่าวมาส่องขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รูปที่ 51 (a-c) พบว่าขยะโฟมนั้นมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร มีโครงสร้างที่กลวงเป็นโฟมเซลล์ปิด (Closed-cellular foam) แต่เนื่องจากกระบวนการบดย่อยของเครื่องมือทำให้ผิวของขยะโฟมบางส่วนเปิดออกรูปร่างไม่เป็นระเบียบด้านในของเซลล์โฟมจะมีลักษณะที่เป็นช่องว่างกลวงจำนวนมากถูกปิดกั้นด้วยผนังโฟมดังนั้นรูพรุนเหล่านี้สามารถกักเก็บอากาศได้จำนวนมากซึ่งเป็นข้อดีในด้านการเป็นฉนวนทางความร้อน



(a)



(b)



(c)

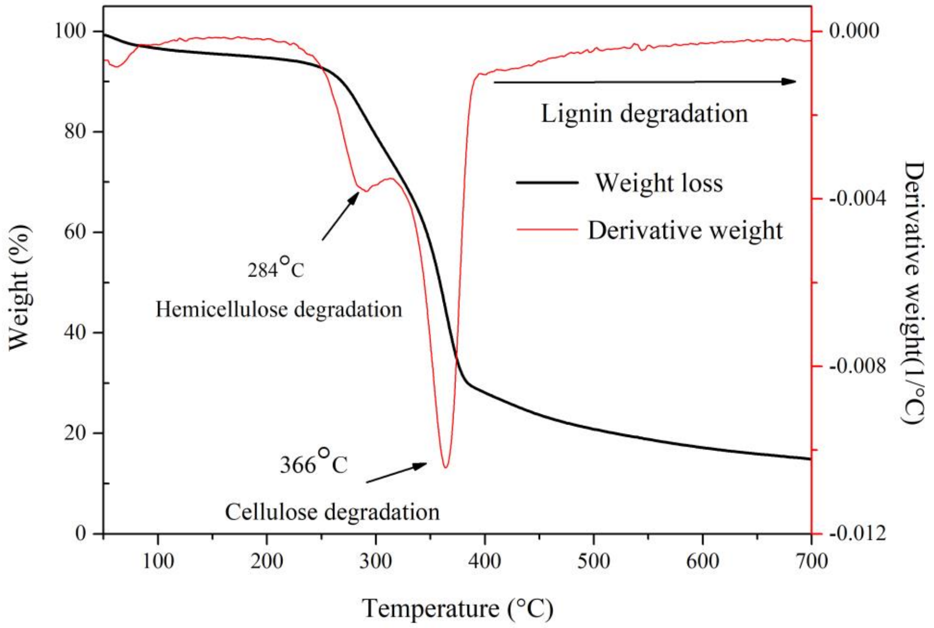
รูปที่ 51 ภาพถ่าย SEM ของขยะโฟม

(a) ลักษณะภายนอกของขยะโฟม (b) ลักษณะของเซลล์โฟมที่กำลังขยาย 200x

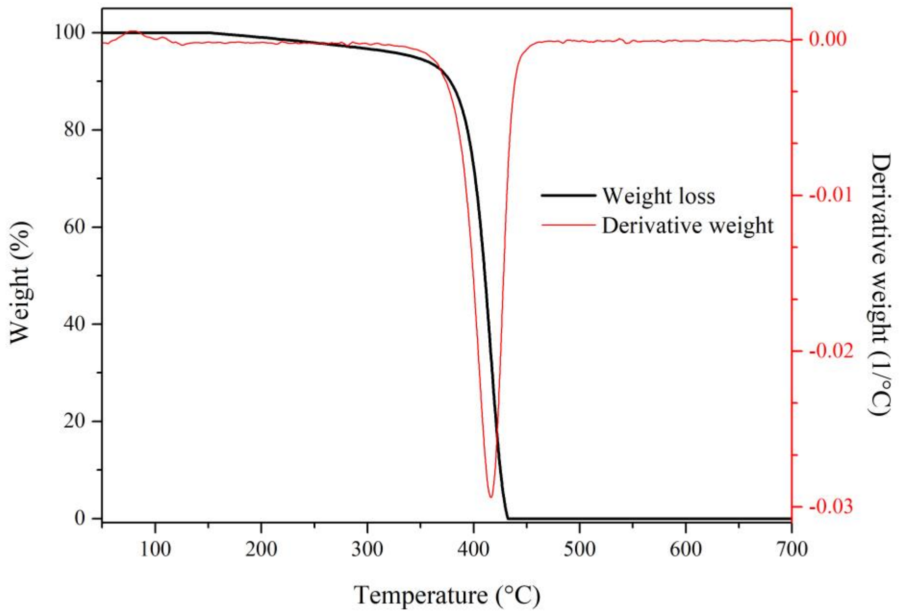
(c) โครงสร้างเซลล์โฟมที่กำลังขยาย 1000x

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟม



รูปที่ 52 เทอร์โมแกรม TG และ DTG ของเส้นใยมะพร้าวภายใต้สภาวะอากาศที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 53 เทอร์โมแกรม TG และ DTG ของขยะโฟม EPS ภายใต้สภาวะอากาศที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ผู้วิจัยได้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยมะพร้าว และขยะโฟม EPS โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ซึ่งจะทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีภายใต้สภาวะอากาศ โดยสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการศึกษานี้ คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Onset degradation temperature; T_{onset}), อุณหภูมิสลายตัวสิ้นสุด (Endset degradation temperature; T_{onset}) และอุณหภูมิการสลายตัวสูงที่สุด (Degradation temperature; T_d) ของเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่า T_{onset}, T_{endset} และ T_d ของเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟม EPS

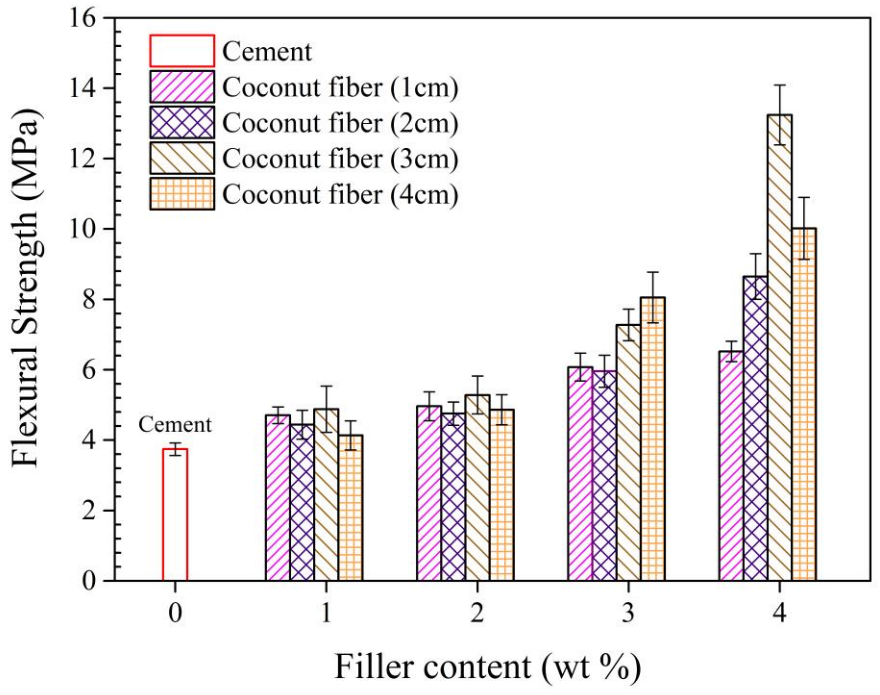
Sample	Peak 1			Peak 2		
	T_{onset} (°C)	T_d (°C)	T_{endset} (°C)	T_{onset} (°C)	T_d (°C)	T_{endset} (°C)
Coconut coir	261	284	309	338	366	386
Waste EPS foam	390	417	437	-	-	-

จากรูปที่ 52 แสดงเทอร์โมแกรม TG และ DTG ของเส้นใยมะพร้าวพบว่ามีการลดลงของน้ำหนักอยู่ 3 ช่วง คือ 50 – 150, 261-309 และ 338-386 องศาเซลเซียสซึ่งการลดลงของน้ำหนักในช่วงแรกระหว่าง 50 – 150 องศาเซลเซียสนั้นเกิดจากการระเหยของความชื้นที่เส้นใยมะพร้าวดูดซับไว้ สำหรับการลดลงของน้ำหนักในช่วงที่สองระหว่าง 261-309 องศาเซลเซียสซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส, เปกติน และการแตกออกของพันธะไกลโคไซด์ของเซลลูโลสโดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_d) ที่ 284 องศาเซลเซียส และการลดลงของน้ำหนักช่วงที่สามเกิดระหว่าง 338-386 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลสโดยการแตกออกของพันธะไกลโคไซด์ในสายโซ่ของกลูโคสและมีการสลายตัวของลิกนินเล็กน้อยซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_d) ที่ 366 องศาเซลเซียส โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าเส้นใยมะพร้าวเป็นสารประกอบจำพวกลิกโนเซลลูโลสซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน การที่เฮมิเซลลูโลสซึ่งมีหมู่อะซีทิลแสดงถึงค่าเสถียรทางความร้อนที่ต่ำกว่าเซลลูโลสและลิกนิน ส่วนลิกนินนั้นจะมีการสลายตัวทางความร้อนเป็นช่วงกว้างตั้งแต่ 150 – 900 องศาเซลเซียส [46] เนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบอะโรมาติกเชิงซ้อน (Aromatic complex) ที่มีกิ่งซับซ้อนซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Prasad และHidalgo [47, 48]

จากรูปที่ 53 แสดงเทอร์โมแกรม TG และ DTG ของขยะโฟม EPS พบว่ามีการลดงลงของน้ำหนักอยู่เพียงช่วงเดียวคือ 390 - 437 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_d) ที่ 417 องศาเซลเซียสซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suresh และคณะ [49]

4.2 การศึกษาผลของขนาด และปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติของซีเมนต์คอมโพสิต

4.2.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว



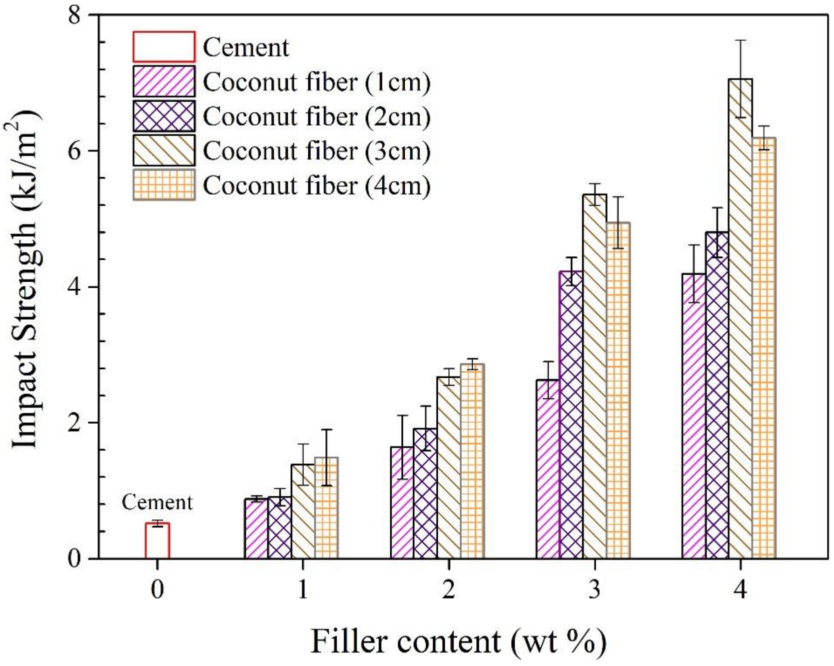
รูปที่ 54 กราฟแสดงค่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ

จากรูปที่ 54 เมื่อพิจารณการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวพบว่าจะมีค่า Flexural strength เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นโดยจะเห็นว่าค่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวนั้นมีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติ เนื่องจากผลของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยกับเส้นใย และเส้นใยกับเมทริกซ์ซีเมนต์ที่ดีนั้นส่งผลให้เส้นใยมะพร้าวยึดติดกับเมทริกซ์นั้นได้ดีช่วยเสริมแรงได้ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่า Flexural strength ให้แก่ซีเมนต์คอมโพสิต [50] และการที่เส้นใยมะพร้าวมีความขรุขระบนเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 50 (d) จะช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับเมทริกซ์ซีเมนต์[51] ส่งผลให้เกิด Interlocking ที่ดี

ระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับเมทริกซ์ซีเมนต์ทำให้สามารถลดแรงเค้นที่จะทำให้เกิดการแตกหักได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hwang และคณะ [37]

การเพิ่มขึ้นของความยาวเส้นใยมะพร้าวนั้นทำให้ค่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นซึ่งเห็นการเพิ่มขึ้นได้ชัดเจนที่การแทนที่เส้นใยมะพร้าวปริมาณร้อยละ 3 และ 4 โดยน้ำหนัก และพบว่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 13.23±1.80 MPa ที่ความยาว 3 เซนติเมตร ปริมาณ 4 %โดยน้ำหนัก แต่เมื่อพิจารณาที่ความยาว 4 เซนติเมตร ปริมาณ 4 % โดยน้ำหนักกลับมี Flexural strength ที่ต่ำลงซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Savastanoc และคณะ [52] ที่ศึกษาการใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์ในซีเมนต์โดยพบว่าการใส่เส้นใยที่มีขนาดยาวมากส่งผลให้การกระจายตัวในเมทริกซ์ซีเมนต์ไม่ดีจึงทำให้ค่า Flexural strength นั้นต่ำลง

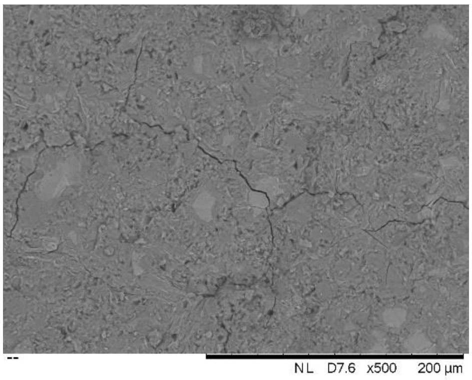
4.2.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว



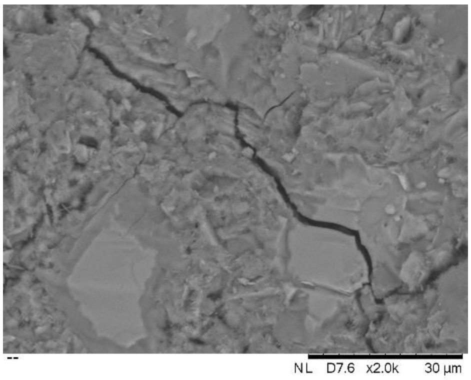
รูปที่ 55 กราฟแสดงค่า Impact strength ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ

ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 55 จะเห็นว่าค่า Impact strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่แทนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยมะพร้าวจะส่งผลให้ค่า Impact strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาการแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่ความยาวเส้นใยมะพร้าว 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตรพบว่าค่า Impact strength จะมีค่าเพิ่มขึ้น 407, 715, 933 และ 854 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ และเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 4 โดยน้ำหนักที่ความยาวเส้นใยมะพร้าว 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตรพบว่าค่า Impact strength จะมีค่าเพิ่มขึ้น 708, 826, 1262 และ 1094 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติจะเห็นว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 4 ที่ความยาว 3 เซนติเมตรนั้นทำให้ค่า Impact strength มีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาที่ความยาว 4 เซนติเมตร ปริมาณ 4 % โดยน้ำหนักกลับมี Impact strength ที่ต่ำลงเนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่ดีเช่นเดียวกับผลของ Flexural strength ข้างต้น สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า Impact strength นั้นมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับ Ramakrishna และคณะ [53] ที่ได้ศึกษาการทดสอบแรงกระแทกของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ (ป่านศรนารายณ์, มะพร้าว,ปอกระเจา, Hibiscus Cannebinus) ซึ่งพบว่าค่า Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ และความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และพบว่าจากเส้นใยธรรมชาติทั้งหมดนั้นเส้นใยมะพร้าวนั้นมีค่า Elongation at break สูงที่สุดส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตกับเส้นใยมะพร้าวนั้นมีสมบัติเชิงกลที่ดี [54]

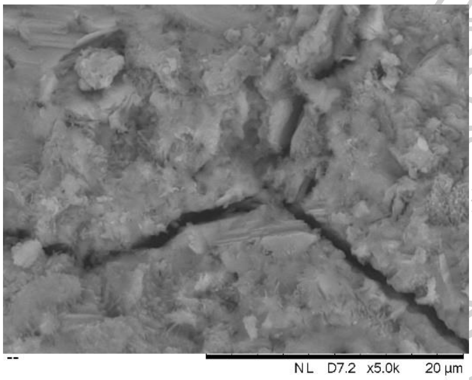
จากรูปที่ 56 แสดงการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซีเมนต์เพสปกติหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทกด้วยเทคนิค SEM พบว่าบนพื้นผิวชิ้นงานซีเมนต์นั้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบและพบจุดกำเนิดรอยแตกร้าวลักษณะ 3 แฉกบนชิ้นงาน และมีการเติบโตของรอยแตกร้าวกระจายออกไปทั่วชิ้นงานซึ่งมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะเมื่อถูกแรงกระแทกส่งผลให้ให้เนื้อของชิ้นงานนั้นแยกออกจากกันโดยง่าย



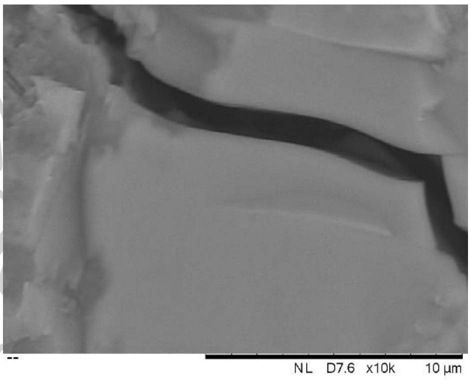
(a)



(b)



(c)

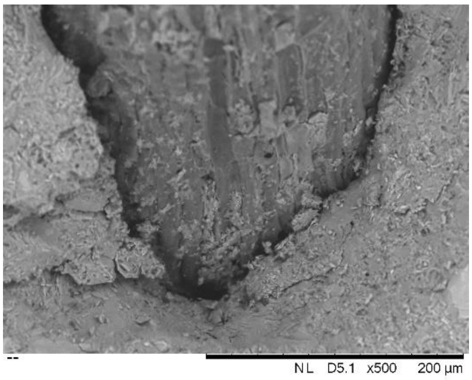


(d)

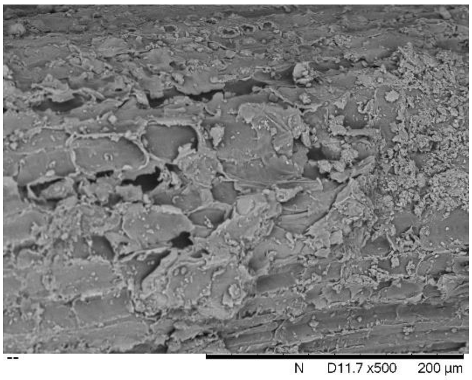
รูปที่ 56 ภาพถ่าย SEM ของซีเมนต์หลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก

ในขณะที่ซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่มีการแตกหักแบบเหนียวเนื่องจากเส้นใยมะพร้าวนั้นมีอันตรกิริยาที่ดีระหว่างเมทริกซ์ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ยึดติดกับเส้นใยมะพร้าวได้ดี จากรูปที่ 57 (a-d) จะเห็นว่าซีเมนต์นั้นสามารถยึดติดได้ทั้งผิวภายนอกของเส้นใยมะพร้าว และยังสามารถเข้าไปยึดติดได้ภายในท่อน้ำเลี้ยงของเส้นใยมะพร้าวได้ อีกทั้งซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวนั้นยังมีพฤติกรรมการแตกหักแบบ Toughening composite ที่มีลักษณะของ Crack bridging (รูปที่ 42) และการหลุดออกของเส้นใย (Pull-out) และการตอบสนองในการต้านทานการแพร่กระจายของรอยร้าวดังจะเห็นได้ว่ารอยร้าวนั้นเกิดขึ้นจากส่วนที่อ่อนแอของเมทริกซ์ซีเมนต์หรือ Air void จากนั้นรอยร้าวนั้นจึงเคลื่อนมาหยุดที่เส้นใยมะพร้าวดังแสดงในรูปที่ 57(e-f) ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของคอมโพสิต [55-57] ส่งผลทำให้ค่า Impact strength สูงขึ้น

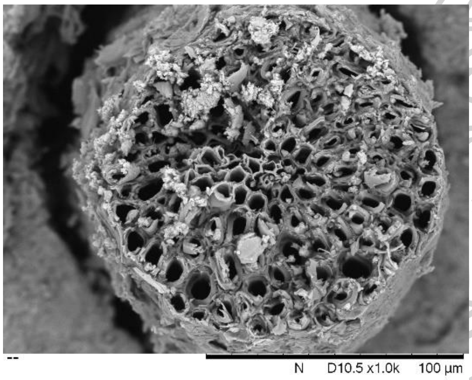
มหาวิทยาลัยศิลปากร



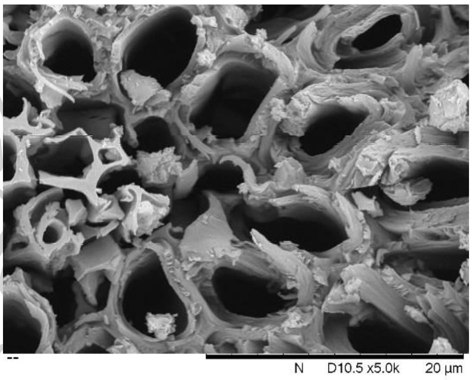
(a)



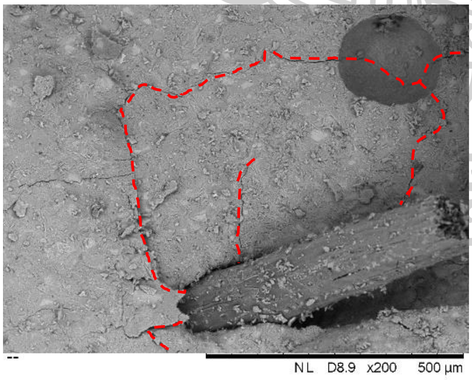
(b)



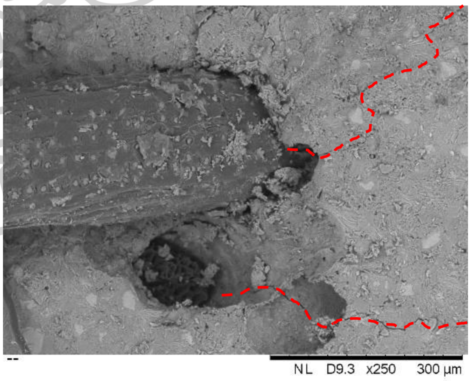
(c)



(d)



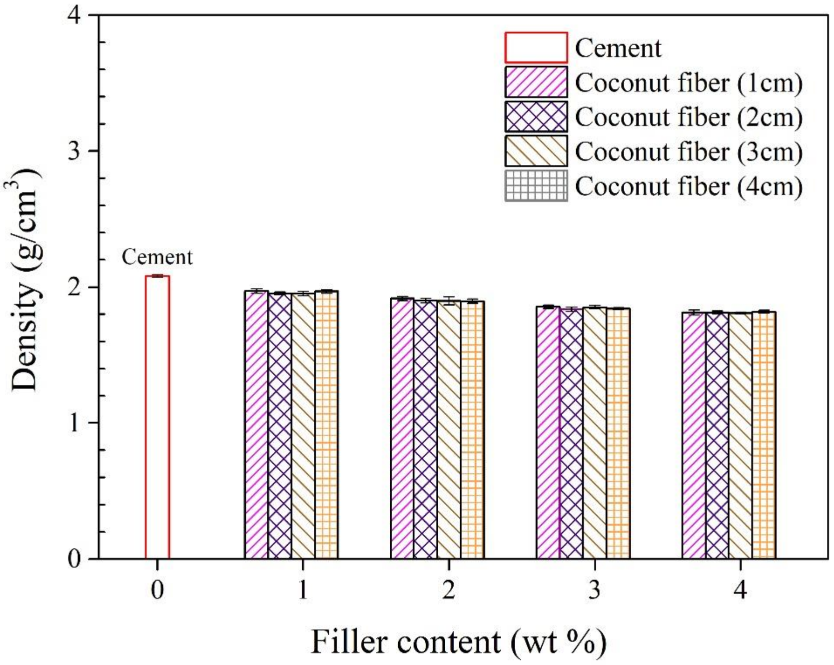
(e)



(f)

รูปที่ 57 ภาพถ่าย SEM ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก

4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว



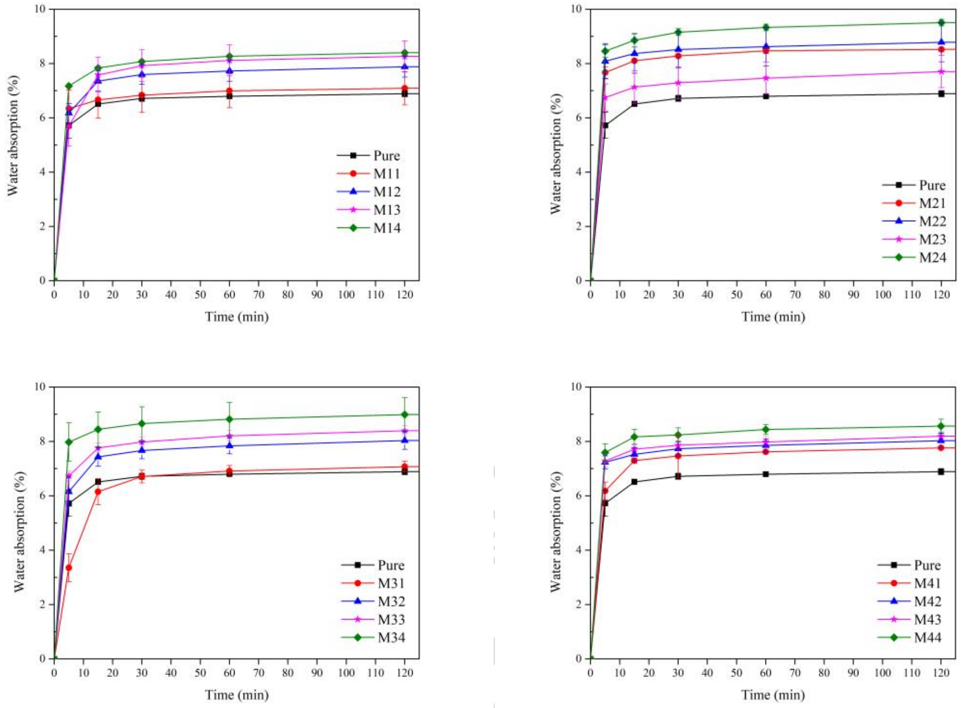
รูปที่ 58 กราฟแสดงค่า Bulk density ของของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (Density test) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 58 พบว่าเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Bulk density มีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ โดยซีเมนต์เพสปกติจะมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.080±0.01 g / cm^3 แต่เมื่อแทนที่เส้นใยมะพร้าว (1 - 4 cm) ที่ปริมาณร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักทำให้มีค่า Bulk density ลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1.965±0.01, 1.902±0.01, 1.845±0.01 และ 1.813±0.003 g / cm^3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของความยาวเส้นใยมะพร้าวแล้วพบว่าไม่ส่งผลต่อค่า Bulk density ซึ่งปกติแล้วการลดลงของ Bulk density ในวัสดุคอมโพสิตนั้นส่วนใหญ่เกิดจากการแทนที่วัสดุที่มีน้ำหนักเบาในวัสดุที่มีน้ำหนักมากกว่า (ปูนซีเมนต์) ซึ่งมีผลสอดคล้องกับกับงานวิจัยของ Lumingkewas และRamakrishna [43, 58] ที่ศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยมะพร้าวพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยมะพร้าวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของซีเมนต์คอมโพสิตลดต่ำลง และมีผลที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันในซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น เช่น เส้นใยอ้อย [59] และ เส้นใยปาล์มน้ำมัน [60]

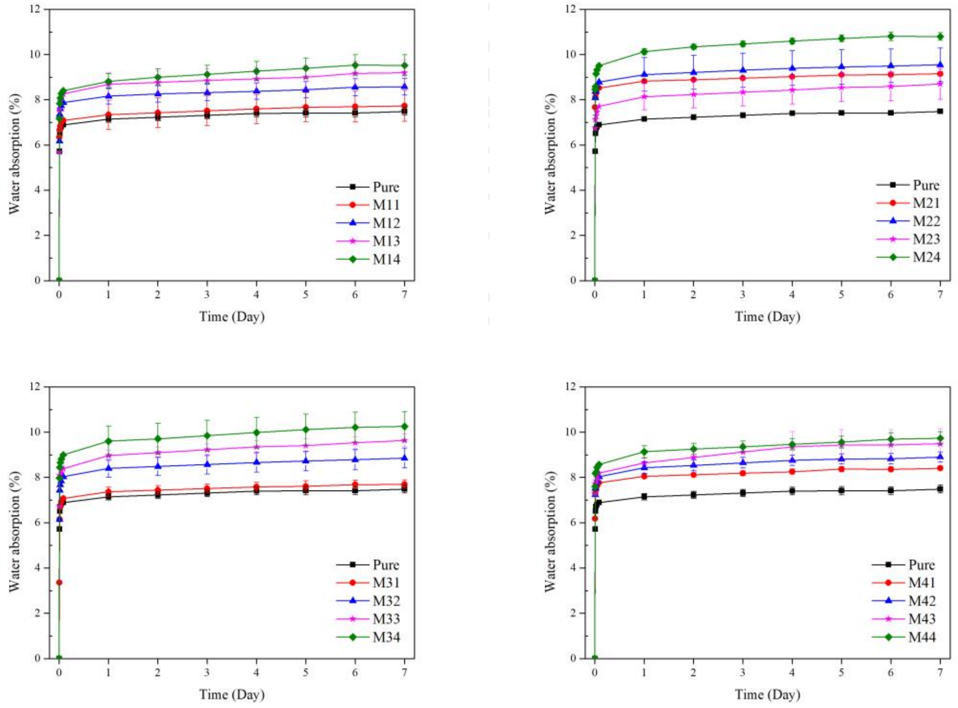
สำหรับการขึ้นรูปซีเมนต์คอมโพสิตนั้นบางครั้งอาจเกิดฟองอากาศ (Air void) ในเนื้อซีเมนต์เมทริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 57 (e) นั้นสามารกักอากาศเอาไว้ได้จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ค่า Bulk density ของซีเมนต์คอมโพสิตลดลง

4.2.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว

จากรูปที่ 59 และ 60 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวต่าง ๆ หลังจากผ่านการบ่มในน้ำ 28 วันเป็นเวลา 7 วัน พบว่าในวันที่ 1 ค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำของซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าวทั้งหมดจะสูงขึ้นอย่างมากในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะเริ่มคงที่และมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงวันที่ 7 เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตที่ 7 วัน พบว่าเมื่อแทนที่เส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์คอมโพสิตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสปกติ การแทนที่เส้นใยมะพร้าว (1 - 4 cm) ที่ปริมาณร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักจึงมีค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 8.24±0.68, 8.97±0.41, 9.26±0.41 และ 10.07±0.579 ตามลำดับซึ่งมีค่ามากกว่าซีเมนต์เพสปกติเฉลี่ยประมาณ 10.15, 19.84, 23.68 และ 34.59 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Abdullah [61]และ Lertwattanaruk [60] ซึ่งทั้งสองงานวิจัยมีผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยมะพร้าวปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเส้นใยธรรมชาตินั้นมีส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลสซึ่งมีความเป็นไฮโดรฟิลิค (Hydrophilic) สูงเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมากที่ผนังเซลล์ อีกทั้งเส้นใยยังมีท่อลำเลียงน้ำ (Lumen) ที่มีลักษณะเปิดดังแสดงในรูปที่ 50(b) ซึ่งลักษณะเหล่านี้ทำให้มีสมบัติการดูดซึมน้ำของเส้นใยเพิ่มขึ้น [62, 63]



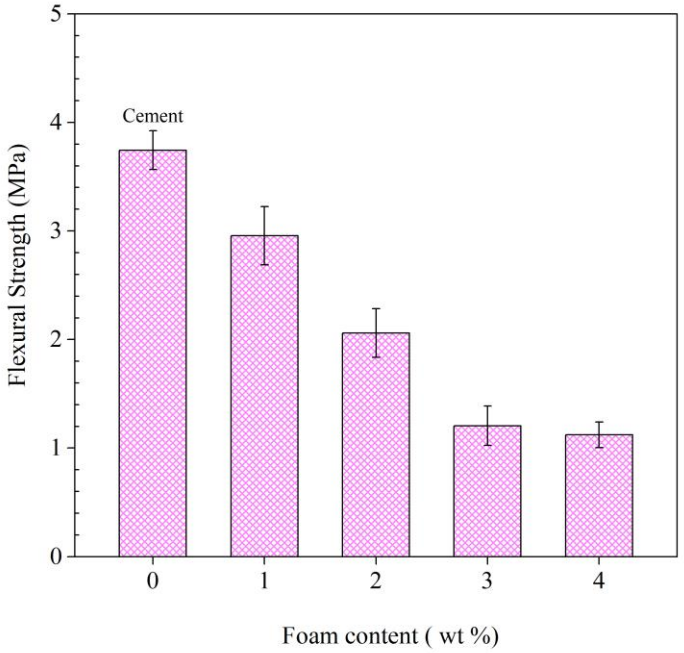
รูปที่ 59 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดและปริมาณต่าง ๆ เป็นเวลา 120 นาที



รูปที่ 60 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ขนาด และปริมาณต่างๆ เป็นเวลา 7 วัน

4.3 การศึกษาผลของปริมาณโฟมที่มีต่อสมบัติวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต

4.3.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม



มหาวิทยาลัยศิลปากร

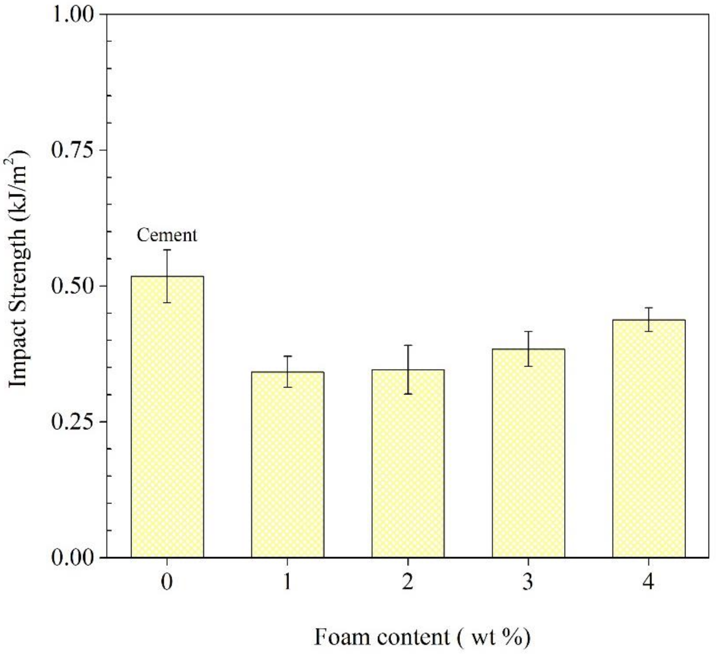
รูปที่ 61 กราฟแสดงค่า Flexural strength ของแผ่นซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ

ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณขยะโฟมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 61 พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขยะโฟมที่ปริมาณร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักทำให้ค่า Flexural strength มีค่าเท่ากับ 2.96±0.27, 2.06±0.22, 1.20±0.18 และ 1.12±0.12 MPa ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่ปริมาณขยะโฟมเพิ่มขึ้น และมีค่าน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mounangac และคณะ[64] ที่ทำการศึกษาซีเมนต์ผสมขยะโฟมยูรีเทนโดยพบว่าอนุภาคของขยะโฟมนั้นมีรูพรุนเป็นจำนวนมากทำให้ซีเมนต์นั้นมีความหนาแน่นที่ต่ำลงตามปริมาณขยะโฟมยูรีเทนที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า Flexural strength ลดลง และมีผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของโฟมคอนกรีตที่มีความเป็นรูพรุนสูงซึ่งได้ถูกรายงานไว้ [65, 66]

ในการขึ้นรูปซีเมนต์ผสมขยะโฟมอนุภาคของขยะโฟมนั้นมีความเป็นไฮโดรโฟบิค (Hydrophobic) สูงแต่ซีเมนต์นั้นมีความเป็นไฮโดรฟิลิค (Hydrophilic) ทำให้ไม่สามารถผสมเข้ากับซีเมนต์ได้ดี [67] ส่งผลให้เกิดการยึดติดที่ต่ำดังรูปที่ 63 (d) ซึ่งจะสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างขยะโฟมกับเมทริกซ์ซีเมนต์ และด้วยอนุภาคโฟมนั้นมีค่า Flexural strength ที่ต่ำอยู่แล้วทำให้ไม่สามารถส่งผ่านแรงเค้นสู่ขยะโฟมได้ซึ่งส่งผลต่อค่า Flexural strength ที่ต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Petrella [68]

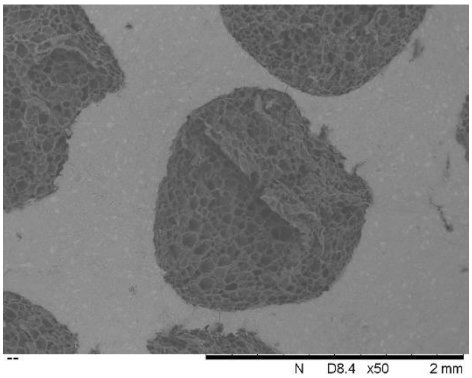
การแทนที่อนุภาคขยะโฟมในเนื้อซีเมนต์เมทริกซ์จะทำให้มี Air – void เกิดขึ้นซึ่งการกระจายตัวของ Air-void ในซีเมนต์เมทริกซ์ที่ไม่ดีแสดงในรูปที่ 63 (b) ส่งผลให้ค่า Flexural strength ลดลง [69] และปัจจัยต่อไปที่ทำให้ค่า Flexural strength ลดลงก็คือการกระจายตัวของขนาด และรูปร่างของอนุภาคขยะโฟมที่ใช้ซึ่งในงานวิจัยนี้อนุภาคของขยะโฟมเกิดจากการบดย่อยแบบสุ่มไม่สามารถควบคุมรูปร่างได้ทำให้ขยะโฟมนั้นมีลักษณะที่ไร้รูปร่าง และจากขนาดที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าน้อยกว่า 2 มิลลิเมตรซึ่งเป็นช่วงที่กว้างจึงมีผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างของขยะโฟมที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ค่า Flexural strength ของวัสดุลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nambiar [70] และ Wee [71]

4.3.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม

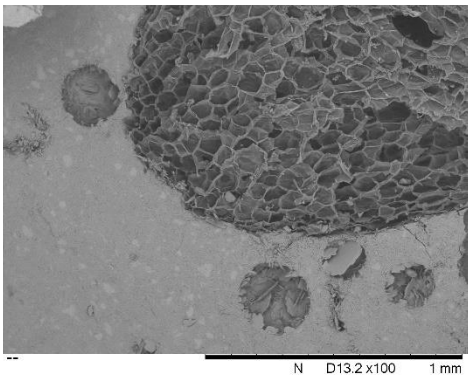


รูปที่ 62 กราฟแสดงค่า Impact strength ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ

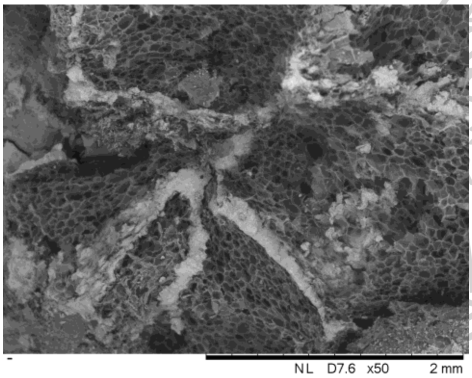
จากรูปที่ 62 กราฟแสดงค่าสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) พบว่าซีเมนต์เพสปกติจะมีค่า Impact strength เท่ากับ 0.52±0.05 kJ/m^2 เมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ด้วยขยะโฟมในปริมาณร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.34±0.03, 0.35±0.05, 0.38±0.03 และ 0.44±0.02 kJ/m^2 ตามลำดับ พบว่าเมื่อแทนที่ปริมาณขยะโฟมในซีเมนต์คอมโพสิตมากขึ้นจะทำให้ค่า Impact strength เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ สำหรับรูปที่ 63 (a-b) แสดงภาพ SEM ของ F1 ซึ่งมีปริมาณขยะโฟมที่น้อยมีการกระจายตัวของอนุภาคโฟมได้ดี แต่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะโฟมมากขึ้นดังสูตร F4 แสดงดังรูปที่ 63 (c) จะเห็นว่าอนุภาคขยะโฟมในซีเมนต์คอมโพสิตนั้นถูกอัดให้ชิดติดกันมากขึ้นซึ่งอาจส่งผลให้ค่า Impact strength เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่การแทนที่ขยะโฟมในซีเมนต์คอมโพสิตนั้นจะทำให้ค่า Impact strength มีน้อยกว่าซีเมนต์เพสปกติในทุกปริมาณ เนื่องจากการแทนที่ขยะโฟมในปริมาณที่มากจะทำให้ Bulk density ต่ำ และอนุภาคของขยะโฟมมีลักษณะที่มียึดติดกับซีเมนต์ไม่ดีและยังมี Air – void จำนวนมาก(รูปที่ 63 (b)) ในเมทริกซ์ เมื่อสังเกตจากรูปที่ 63 (e-f) จะเห็นว่าเมื่อซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมนี้ได้รับแรงกระแทกส่วนที่เป็นอนุภาคของขยะโฟมนั้นซึ่งอ่อนแอจะเป็นจุดรวมของแรงเค้น (Stress concentration) ทำให้เกิดรอยแตกร้าวออกจากอนุภาคขยะโฟมเคลื่อนที่ไปยังซีเมนต์เมทริกซ์ การแทนที่ซีเมนต์ด้วยขยะโฟมนั้นอาจจะมีข้อด้อยในเรื่องของค่าความแข็งแรงที่ต่ำแต่จะมีข้อดีในด้านการนำความร้อน และมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำ



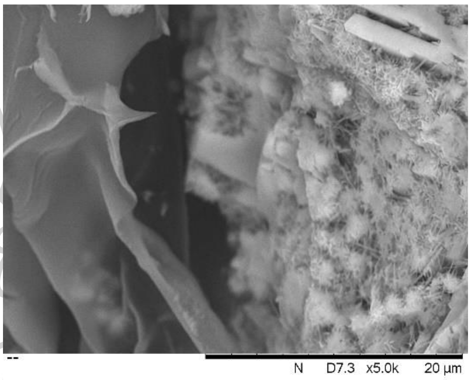
(a)



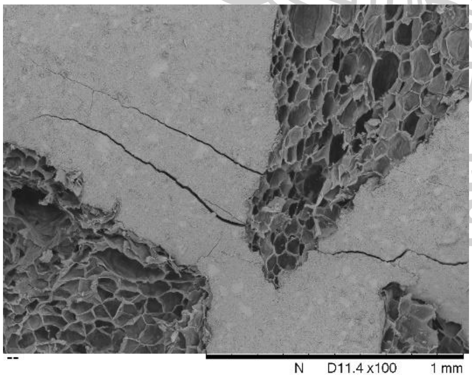
(b)



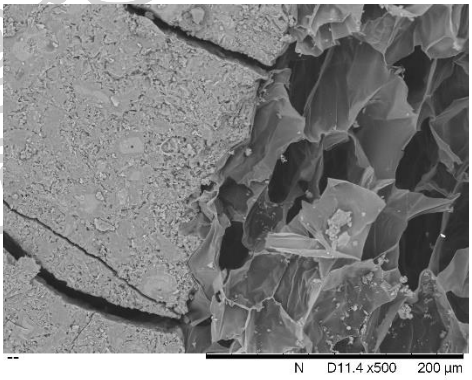
(c)



(d)



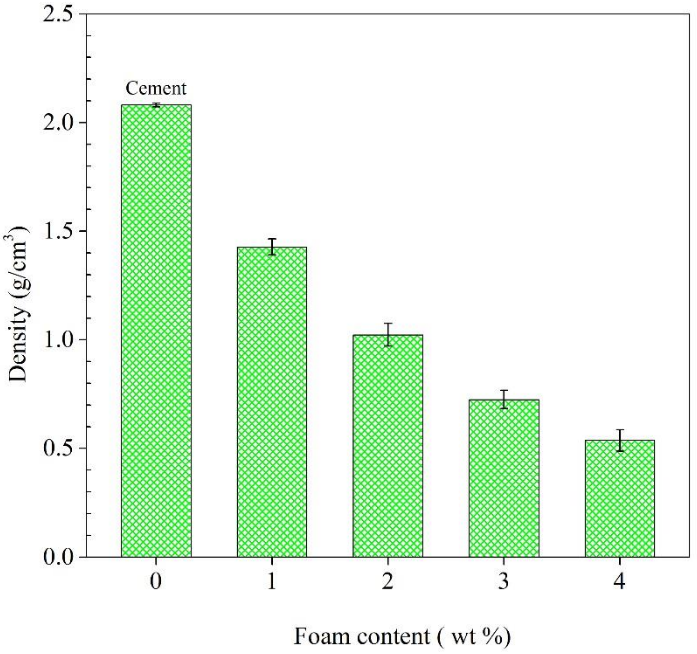
(e)



(f)

รูปที่ 63 ภาพ SEM ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมหลังการทดสอบการรับแรงกระแทก

4.3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม

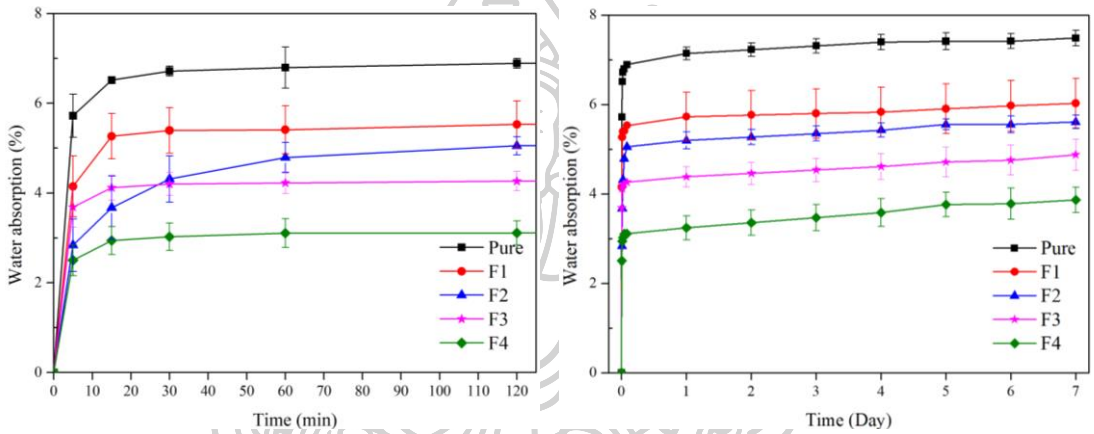


รูปที่ 64 กราฟแสดงค่า Bulk density ของซีเมนต์คอมโพสิตผสมขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ

ผลการทดสอบค่า Bulk density ของซีเมนต์โพสิตคอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 64 พบว่าซีเมนต์เพสปกติจะมีค่า Bulk density เท่ากับ 2.080 ± 0.009 g / cm^3 แต่เมื่อแทนที่ขยะโฟมลงไปที่ร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักส่งผลให้มีค่า Bulk density ลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1.428±0.037, 1.023±0.052, 0.725±0.042 และ 0.537±0.050 g / cm^3 ตามลำดับ โดยคิดเป็นการลดลงร้อยละ 31.37, 50.83, 65.17 และ 74.21 ตามลำดับ กล่าวคือการแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณขยะโฟมเพิ่มขึ้นจะทำให้ซีเมนต์คอมโพสิตนั้นมีค่า Bulk density ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dixit, Chen และ Nambiar [42, 72, 73] ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผลของการยึดเกาะกันที่อ่อนแอระหว่างซีเมนต์เมทริกซ์กับอนุภาคขยะโฟม ที่เกิดจากการ Wettability ที่ไม่สมบูรณ์ในระหว่างการขึ้นรูปซีเมนต์คอมโพสิตทำให้เกิดช่องว่างขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dong [74] อีกทั้งโครงสร้างของอนุภาคโฟมนั้นมีลักษณะคล้ายรวงผึ้ง (Honeycomb) ดังแสดงในรูปที่ 51(c) ซึ่งมีลักษณะที่กลวงภายในสามารถกักเก็บอากาศเอาไว้ได้ทำให้อนุภาคโฟมนั้นมีความหนาแน่นที่ต่ำเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์จึงทำให้สามารถลดความหนาแน่นรวมลงได้

นอกจากนี้งานวิจัยของ Ganesh babu [75] แสดงให้เห็นว่าค่า Bulk density ของซีเมนต์ผสม EPS foam นั้นมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลคือค่า Compressive strength กล่าวคือการเพิ่ม Bulk density หรือลดปริมาณ EPS foam จะทำให้ค่า Compressive strength เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับค่า Flexural Strength และ Impact Strength ในงานวิจัยนี้

4.3.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม



รูปที่ 65 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 65 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆหลังจากผ่านการบ่มในน้ำ 28 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 1 และค่อยๆคงที่จากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงวันที่ 7 โดยซีเมนต์เพสปกติจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากที่สุดเท่ากับ 7.48±0.18 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อแทนที่ด้วยขยะโฟมในปริมาณร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักจะมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 6.03±0.56, 5.61±0.15, 4.88±0.35 และ 3.87±0.29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 19.49, 25.09, 34.81 และ 48.35 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติกล่าวคือเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่ด้วยปริมาณขยะโฟมในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ปกติแล้วการแทนที่ซีเมนต์ด้วยอนุภาคขยะโฟมในปริมาณที่น้อยนั้นจะทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้นน้ำจึงสามารถเข้ามาแทนที่ช่องว่างนี้ได้แต่เมื่อมีการแทนที่ของขยะโฟมเพิ่มขึ้นจนแน่นเต็มที่พอที่จะทำให้ช่องว่างเหล่านี้ลดลงจนทำให้น้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปได้เนื่องจากขยะโฟมส่วนใหญ่นั้นมีโครงสร้าง

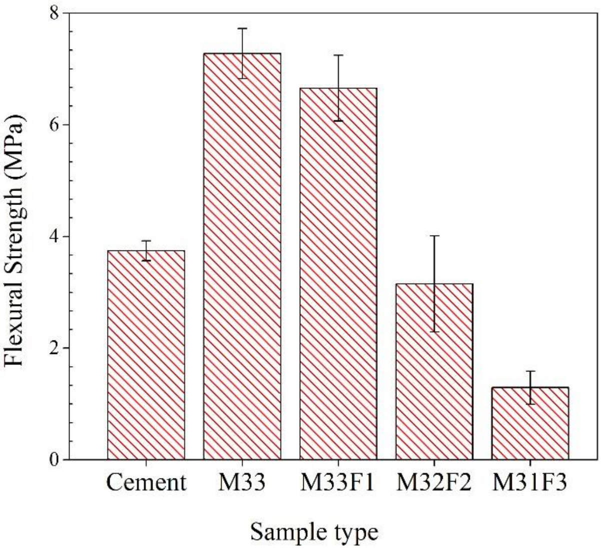
แบบ Honeycomb และยังมีลักษณะเป็นเซลล์ปิดส่งผลให้น้ำไม่สามารถผ่านเข้ามาอยู่ภายในเซลล์ของโฟมได้

สำหรับการแทนที่ของขยะโฟมในคอมโพสิตนั้นไม่เพียงแต่ซีเมนต์จะดูดซึมน้ำอย่างเดียวแต่ขยะโฟมที่ถูกบดย่อยนั้นทำให้ผนังโฟมบางส่วนถูกเปิดออกก็ทำให้น้ำบางส่วนเข้าไปอยู่ในรูเปิดเหล่านั้นได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 51(b) ขยะโฟมจึงสามารถดูดน้ำได้เล็กน้อยเช่นกันซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Laukaitis และคณะ [67] ที่ทำการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำระหว่างอนุภาคโฟม Polystyrene และ Recycled polystyrene foam ที่ผ่านกระบวนการบดย่อย พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ Polystyrene foam ปกติมีค่า 1.9% แต่เมื่อถูกบดย่อยเป็น Recycled polystyrene foam มีค่า 2.3% เนื่องจากกระบวนการบดย่อยจะทำความให้ผิวโฟมเปิดออกเป็นรูพรุน

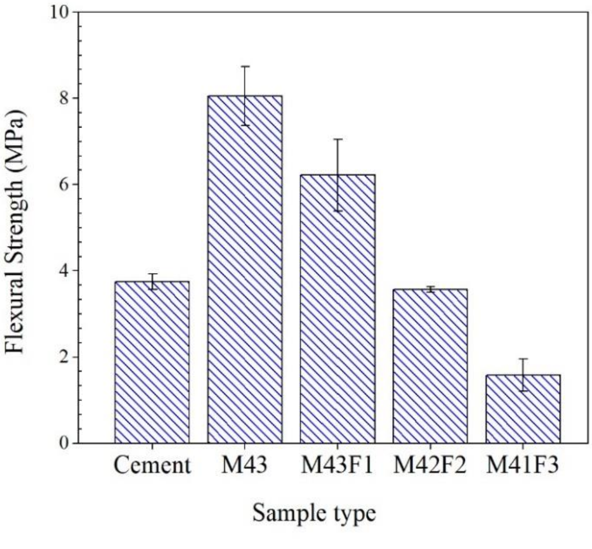
4.4 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต

4.4.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว

จากรูปที่ 66 แสดงผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของซีเมนต์คอมโพสิต M33 M33F1 M32F2 และ M31F3 ซึ่งมีค่า Flexural strength เท่ากับ 7.27±0.44, 6.65±0.59, 3.15±0.86 และ 1.29±0.29 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าค่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ขยะโฟมเพิ่มขึ้น และมีการลดลงของปริมาณเส้นใยมะพร้าวลงซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับซีเมนต์คอมโพสิตกับเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมที่มีความยาวเพิ่มขึ้นคือ 4 เซนติเมตร โดยที่ M43 M43F1 M42F2 และ M41F3 มีค่า Flexural strength เท่ากับ 8.05±0.72, 6.28±0.83, 3.56±0.06 และ 1.58±0.37 MPa ตามลำดังรูปที่ 67 ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มขยะโฟมลงในซีเมนต์คอมโพสิตนั้นจะทำให้ค่า Flexural strength ลดลงอย่างมากเมื่อเติมขยะโฟมมากกว่า 2 % (M33F1, M43F1) แต่ที่ปริมาณขยะโฟมน้อย (M33F1, M32F2, M43F1, M42F2) จะมีการทำงานร่วมกันของเส้นใยมะพร้าวและอนุภาคขยะโฟมในซีเมนต์คอมโพสิตเพื่อต้านทานแรงกดดัดซึ่งอนุภาคของขยะโฟมในซีเมนต์คอมโพสิตนั้นมีส่วนช่วยจำกัดการเติบโตของรอยแตกร้าว และเส้นใยมะพร้าวทำให้เกิดสะพานเส้นใย (Fiber bridges) เชื่อมต่อระหว่างรอยร้าวซึ่งมีส่วนช่วยในการปรับปรุงค่า Flexural strength ได้

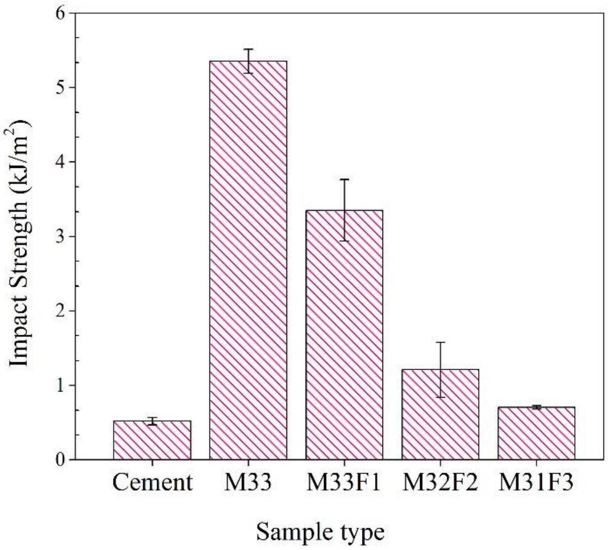


รูปที่ 66 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3 เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Flexural strength

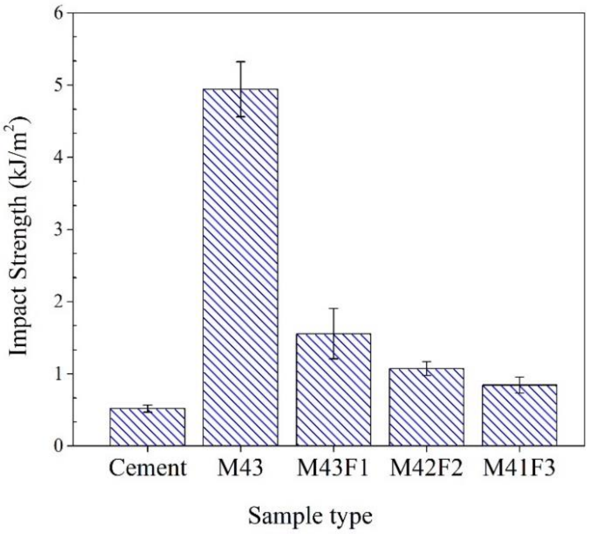


รูปที่ 67 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 4 เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Flexural strength

4.4.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว



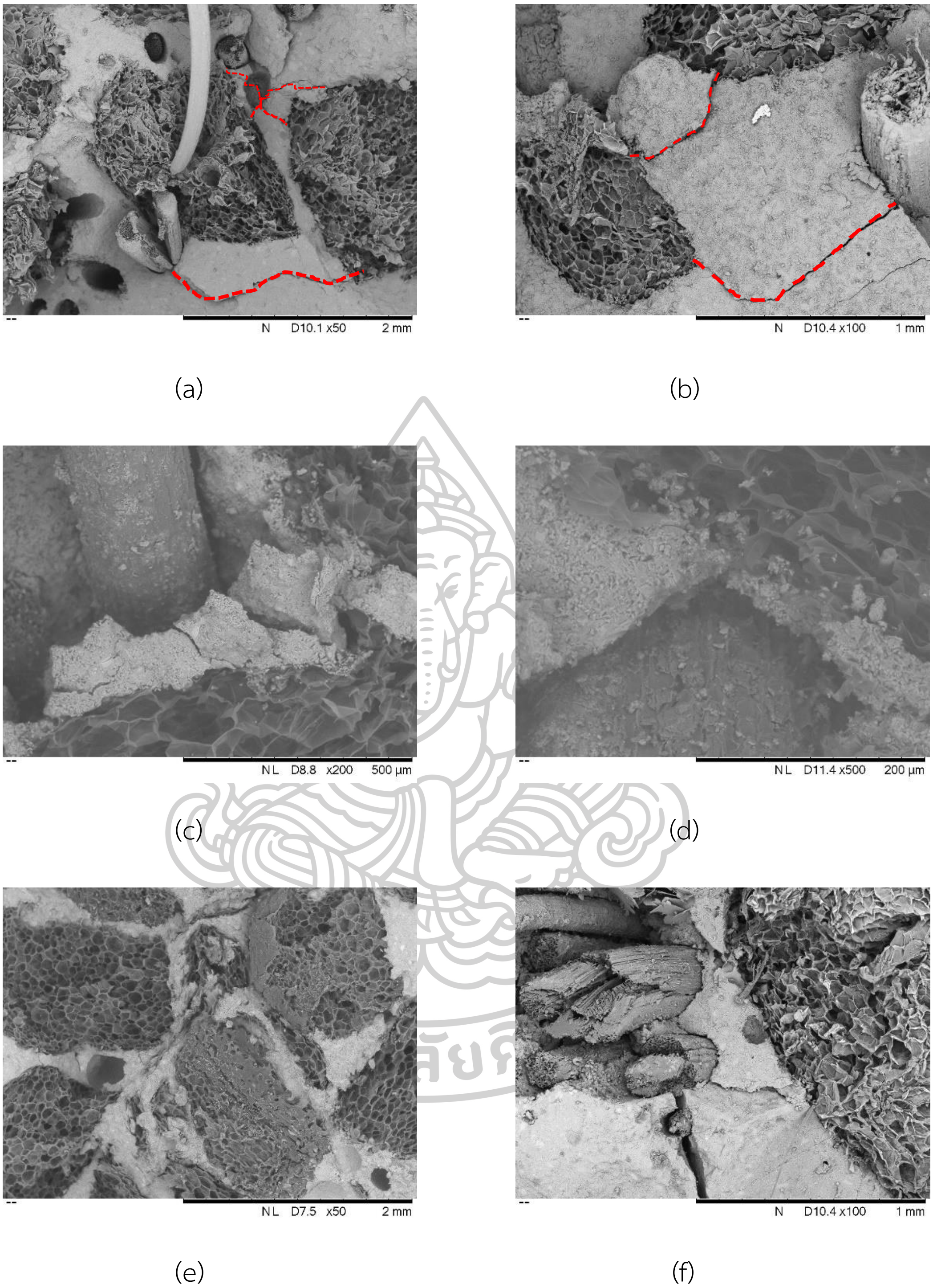
รูปที่ 68 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3 เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Impact strength



รูปที่ 69 กราฟแสดงผลการแทนที่ปริมาณขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 4 เซนติเมตรที่ส่งผลต่อค่า Impact strength

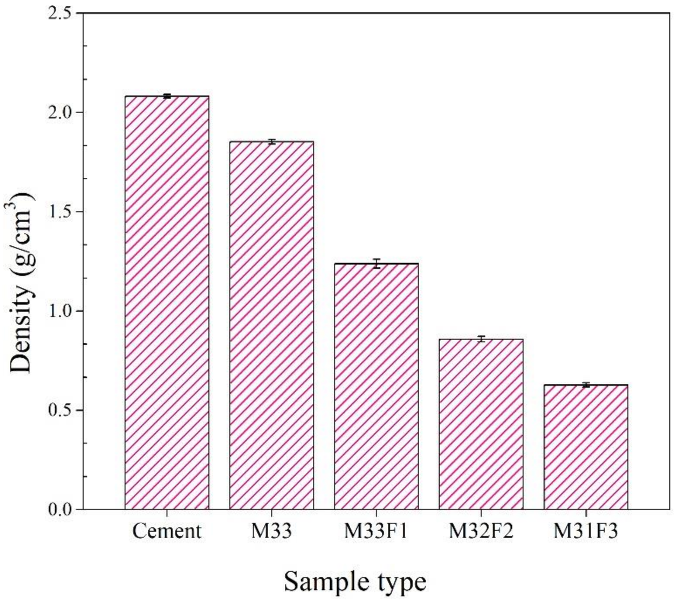
จากรูปที่ 68 แสดงผลการทดสอบความต้านแรงกระแทกของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว สำหรับซีเมนต์เพสปกตินั้นมีค่าเท่ากับ 0.52±0.05 kJ/m^2 และ M33, M33F1, M32F2 และ M31F3 ซึ่งมีค่า Impact strength เท่ากับ 5.35±0.16, 3.35±0.41, 1.21±0.37 และ 0.70±0.02 kJ/m^2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสปกติแล้วมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 933.59, 547.10, 133.59 และ35.90 ตามลำดับจะเห็นว่าค่า Impact strength ของซีเมนต์คอมโพสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่ขยะโฟมเพิ่มขึ้นแต่ยังมีค่า Impact strength สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติ เนื่องจากมีเส้นใยมะพร้าวที่คอยช่วยในการรับแรงกระแทกอยู่ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมกับเส้นใยมะพร้าวที่มีความยาวเพิ่มขึ้นได้แก่ M43 M43F1 M42F2 และ M41F3 ดังรูปที่ 69 ซึ่งมีค่า Impact strength เท่ากับ 4.94±0.38, 1.56±0.35, 1.07±0.10, 0.84±0.11 kJ/m^2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสปกติแล้วมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 854.05, 200.38, 106.95 และ 62.93 ตามลำดับ

จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทกด้วยเทคนิค SEM รูปที่ 70 (a-b) แสดงภาพ SEM ของ M33F1 ที่ปริมาณขยะโฟมในคอมโพสิตนั้นต่ำจะพบเส้นใยส่วนมากกระจายได้ดีตัวอยู่บนซีเมนต์เมทริกซ์ และพบว่ามีรอยแตกร้าวบนเมทริกซ์เคลื่อนที่มายังหยุดที่เส้นใยมะพร้าว และยังสามารถสังเกตเห็นเส้นใยที่หลุดออก (Fiber pulled-out) จากซีเมนต์เมทริกซ์ มีเส้นใยมะพร้าวบางส่วนนั้นได้ความเสียหายซึ่งแสดงถึงสมบัติแบบเหนียว (Ductile material) แต่เมื่อปริมาณขยะโฟมในคอมโพสิตเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 70(c-f) แสดงภาพ SEM ของ M31F3 พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่นั้นถูกครอบครองด้วยขยะโฟมซึ่งมีซีเมนต์น้อยมากที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานทำให้เกิดช่องว่างระหว่างขยะโฟม เส้นใยมะพร้าว และซีเมนต์ขนาดใหญ่และบางพื้นที่เส้นใยมะพร้าวอยู่ติดกับขยะโฟมจำนวนมากเมื่อชิ้นงานได้รับแรงจะเกิดการหลุดออกของเส้นใยมะพร้าวได้โดยง่ายส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความอ่อนแออีกทั้งยังมีผลของการรวมตัวกันของเส้นใยมะพร้าวทำให้เกิดการกระจายตัวไม่ดีส่งผลให้สมบัติเชิงกลของซีเมนต์คอมโพสิตต่ำ



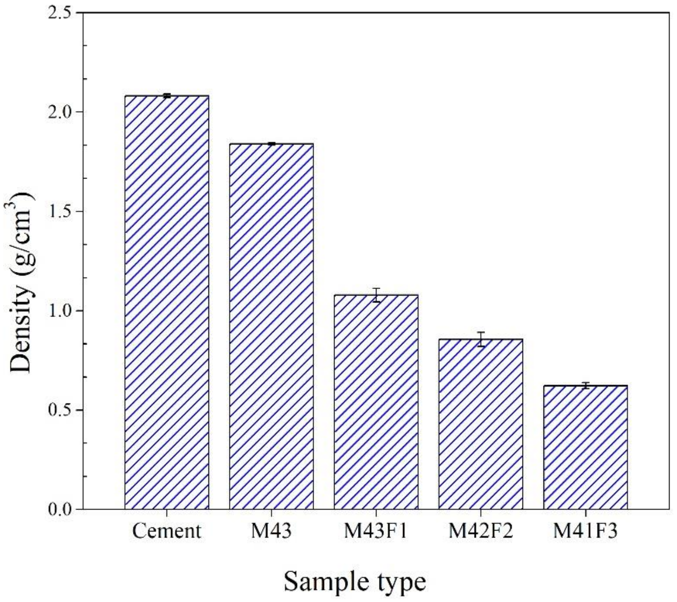
รูปที่ 70 ภาพ SEM ของซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าว และขยะโฟมหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก (a)-(b) M33F1, (c)-(f) M31F3

4.4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 71 กราฟแสดงผลการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3 เซนติเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อค่า Bulk density

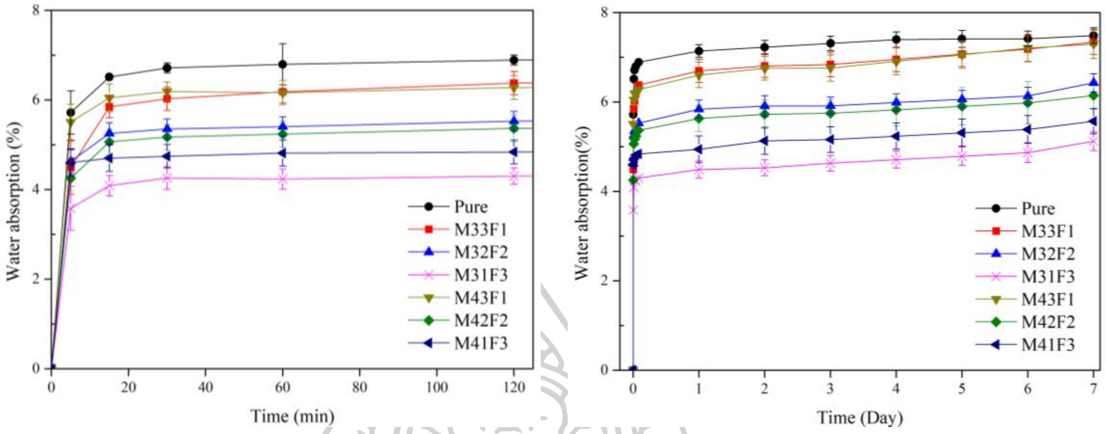
จากรูปที่ 71 แสดงค่า Bulk density ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3 เซนติเมตรจะเห็นว่าซีเมนต์เพสปกติจะมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.08±0.01 g / cm^3 และซีเมนต์คอมโพสิต M33 M33F1 M32F2 และ M31F3 ซึ่งมีค่า Bulk density เท่ากับ 1.85±0.01, 1.24±0.02, 0.86±0.01 และ 0.63±0.01 g / cm^3 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสปกติพบว่ามีการลดลงร้อยละ 11.03, 40.51, 58.75 และ 69.83 ตามลำดับ กล่าวคือการแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณขยะโฟมเพิ่มขึ้นจะทำให้ซีเมนต์คอมโพสิตนั้นมีค่าความหนาแน่นลดต่ำลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ ส่วนการเพิ่มปริมาณของเส้นใยมะพร้าวนั้นมีส่วนช่วยทำให้ค่า Bulk density ลดลงเล็กน้อย การลดลงของค่า Bulk density นั้นนอกจากผลของปริมาณวัตถุดิบที่ผสมแล้วยังมีผลของช่องว่างและ Air-void ที่เกิดขึ้นบนเมทริกซ์ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตอนที่ 1 และ 2



รูปที่ 72 กราฟแสดงผลการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 4 เซนติเมตรที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อค่า Bulk density

จากรูปที่ 72 จะเห็นว่าซีเมนต์เพสปกติจะมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.08±0.01 g / cm^3 และซีเมนต์คอมโพสิต M43 M43F1 M42F2 และ M41F3 ซึ่งมีค่า Bulk density เท่ากับ 1.84±0.01, 1.08±0.03, 0.86±0.03 และ 0.62±0.02 g / cm^3 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติพบว่ามีการลดลงร้อยละ 11.60, 48.17, 58.84 และ 70.07 ตามลำดับ ซึ่งมีผลลดลงเช่นเดียวกับเส้นใยมะพร้าวที่ความยาว 3 เซนติเมตร กล่าวคือการแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณขยะโฟมเพิ่มขึ้นจะทำให้ซีเมนต์คอมโพสิตนั้นมีค่าความหนาแน่นรวมลดต่ำลง และการแทนที่ซีเมนต์ด้วยปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นจะทำให้ซีเมนต์คอมโพสิตนั้นมีค่าความหนาแน่นรวมลดต่ำลงเช่นกัน

4.4.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 73 ผลการดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 73 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมที่ปริมาณต่าง ๆหลังจากผ่านการบ่มในน้ำ 28 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 1 และเริ่มคงที่และมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงวันที่ 7 ซีเมนต์เพสปกติจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากที่สุดเท่ากับ 7.48±0.18 % จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวกับขยะโฟมทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าซีเมนต์เพสปกติซึ่งมีแนวโน้มในการลดลงตามปริมาณขยะโฟมที่เพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณเส้นใยมะพร้าวพบว่าการแทนที่ด้วยปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของซีเมนต์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น สำหรับความยาวเส้นใยมะพร้าวที่ 3 และ 4 เซนติเมตรส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของคอมโพสิตอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยผลการทดลองดังกล่าวมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยในตอนที่ 1 และ 2 ดังนั้นอิทธิพลของปริมาณเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมในการทดลองนี้ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ M33F1, M43F1, M32F2, M42F2 และ M41F3 มีค่าเท่ากับ 7.34±0.28, 7.29±0.32, 6.43±0.21, 6.15±0.32 และ 5.57±0.28 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่ง M31F3 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 5.12±0.21 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 14 ค่าสมบัติเชิงกลของซีเมนต์คอมโพสิต

Formula	Flexural strength (MPa)	Impact strength (kJ/m^2)	Bulk density (g/cm^3)	Water absorption (%) at 7 day
Cement	3.74 ± 0.18	0.52 ± 0.05	2.08 ± 0.01	7.49 ± 0.18
M34	13.24 ± 1.80	7.06 ± 0.57	1.81 ± 0.01	10.25 ± 0.65
F1	2.96 ± 0.27	0.34 ± 0.03	1.43 ± 0.02	6.03 ± 0.55
F2	2.06 ± 0.22	0.35 ± 0.05	1.02 ± 0.05	5.61 ± 0.15
M33F1	6.65 ± 0.59	3.35 ± 0.41	1.24 ± 0.02	7.34 ± 0.27
M33F2	3.15 ± 0.86	1.21 ± 0.37	0.86 ± 0.01	6.43 ± 0.21
M43F1	6.22 ± 0.88	1.56 ± 0.35	1.08 ± 0.03	7.30 ± 0.33
M42F2	3.56 ± 0.06	1.07 ± 0.10	0.86 ±0.04	6.15 ± 0.32

การรวมกันของเส้นใยมะพร้าว และขยะโฟมนั้นสามารถปรับปรุงค่า Flexural strength Impact strength และ ลด Bulk density ดังแสดงตารางที่ 14 และ ค่า Flexural strengthและ Impact strength ที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการเติมเส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์คอมโพสิต ในขณะที่การเติมขยะโฟมนั้นจะช่วยลด Bulk density แต่การเติมขยะโฟมนั้นจะทำให้ค่า Flexural strength และ Impact strength ในซีเมนต์คอมโพสิตต่ำลงซึ่งสามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มเส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์คอมโพสิต สำหรับซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณ 3 % ความยาว 3 เซนติเมตรกับขยะโฟม 1 % (M33F1) นั้นมีการเพิ่มขึ้นของค่า Flexural strength (77.73%) และImpact strength (547.10%) แต่ค่าของ Bulk density ลดลง (41%) เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ

ซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณ 2 % ความยาว 3 เซนติเมตรกับขยะโฟม 2 % (M32F2) นั้นมีการเพิ่มขึ้นของค่า Impact strength (133%) และมีการลดลงของค่า Flexural strength (15%) และ Bulk density (58.74%) เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ

ซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณ 3 % ความยาว 4 เซนติเมตรกับขยะโฟม 1 % (M43F1) นั้นมีการเพิ่มขึ้นของค่า Flexural strength (66.09%) Impact strength (200.39%) แต่ค่า Bulk density ลงลง (48.17%) เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ

ซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวที่ปริมาณ 2 % ความยาว 4 เซนติเมตรกับขยะโฟม 2 % (M42F2) นั้นมีการเพิ่มขึ้นของค่า Impact strength (106.95%) และมีการลดลงของค่า Flexural strength (4.81%) และBulk density (58.84%) เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ

จากการศึกษาผลของการผสมปูนซีเมนต์ ขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวข้างต้นนั้นดังตารางที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิต M33F1 M32F2 M43F1 M42F2 พบว่าซีเมนต์คอมโพสิต M33F1 และ M32F2 แสดงให้เห็นถึงค่าสมบัติเชิงกล (Flexural strength, Impact strength และ Bulk density) ที่ดีกว่า M43F1 M42F2 ซึ่งยอมรับได้สำหรับ Structural lightweight cement ที่มีความแข็งแรง และมีน้ำหนักเบาเหมาะสำหรับที่จะนำไปทำเป็นแกนกลาง (Core layer) ที่มี Bulk density ต่ำแต่ยังคงให้ความแข็งแรง

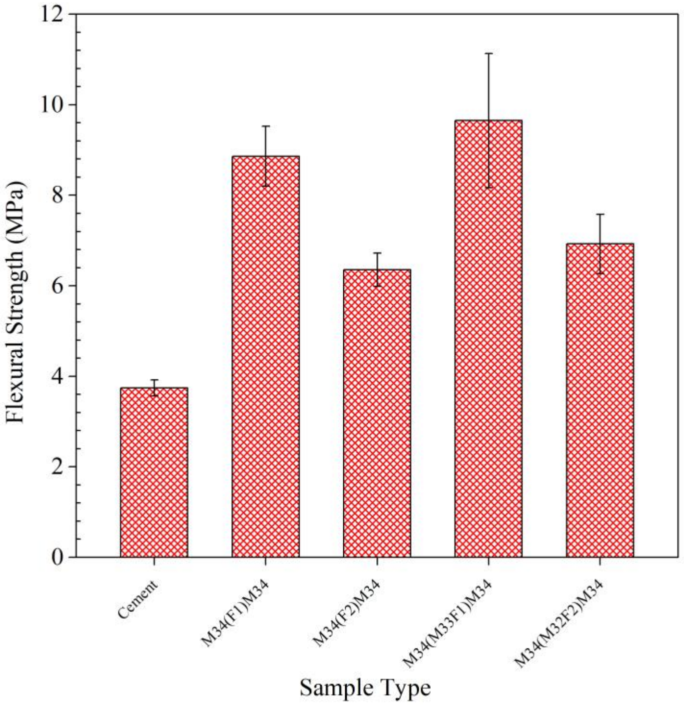
สำหรับซีเมนต์คอมโพสิต F1 และ F2 นั้นจากผลการทดลองตอนที่ 2 แสดงจุดเด่นในด้านการมีค่า Bulk density ที่ต่ำเหมาะสำหรับที่จะนำไปทำเป็นแกนกลาง (Core layer)

สำหรับซีเมนต์คอมโพสิต M34 นั้นจากผลการทดลองตอนที่ 1 แสดงจุดเด่นในค่า Flexural strength และ Impact strength ที่สูงที่สุดเหมาะสำหรับนำไปทำเป็นวัสดุประกบ (Outer core) เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับแซนด์วิชคอมโพสิต

4.5 การศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

สำหรับการพัฒนาโครงสร้างแซนด์วิชผู้วิจัยได้นำ M34 ซึ่งเป็นคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุดในตอนที่ 1 นำมาเป็นส่วนประกบเพื่อช่วยต้านทานการดัดงอ และในส่วนของแกนกลางจะเป็นส่วนที่ต้องการค่าความต้านทานความร้อนที่สูง น้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงซึ่งจะเป็นสูตรที่มีส่วนประกอบของขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวจากตอนที่ 2 และ 3 นำมาประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิช

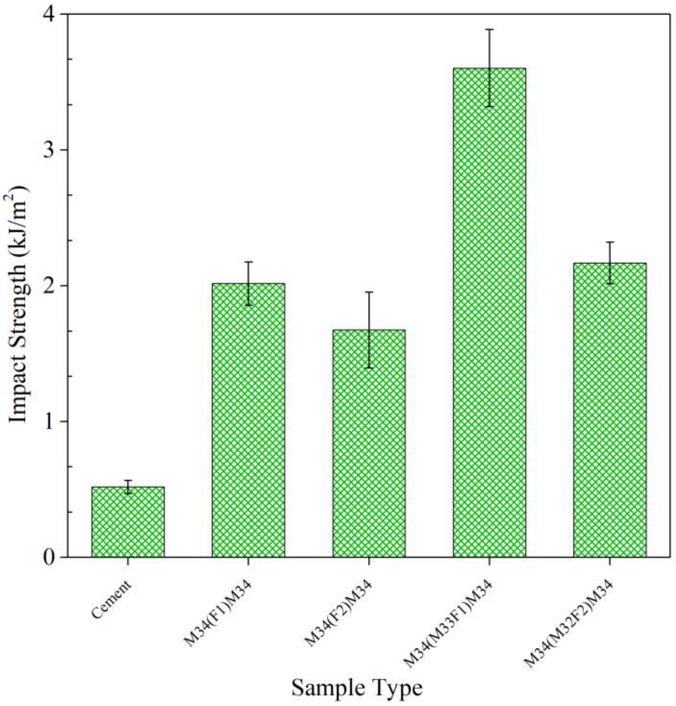
4.5.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 74 กราฟแสดงค่า Flexural strength ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

จากรูปที่ 74 แสดงค่า Flexural strength ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวพบว่าค่า Flexural strength ของซีเมนต์เพสปกติเท่ากับ 3.74±0.18 MPa และค่า Flexural strength ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว M34(F1)M34, M34(F2)M34, M34(M33F1)M34, และ M34(M32F2)M34 มีค่าเท่ากับ 8.86±0.66, 6.36±0.37, 9.65±1.90 และ 6.93±0.65 MPa ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติพบว่ามีการเพิ่มขึ้นร้อยละ 136.70, 69.76, 157.73 และ 85.02 ตามลำดับ

4.5.2 ผลการทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test) ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

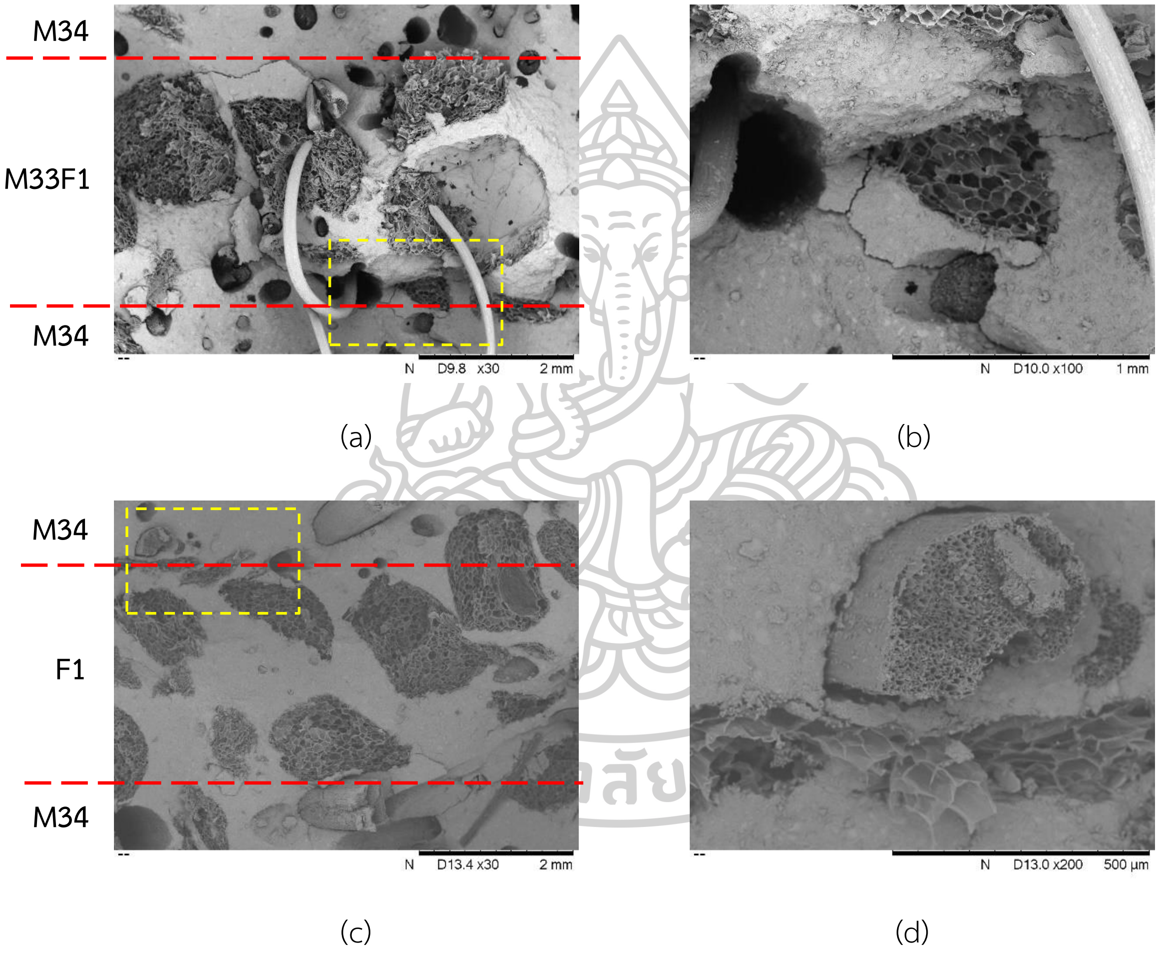


รูปที่ 75 กราฟแสดงค่า Impact strength ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

จากรูปที่ 75 พบว่าค่า Impact strength ของซีเมนต์เพสปกติเท่ากับ 0.52±0.05 kJ/m^2 และค่า Impact strength ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว M34(F1)M34, M34(F2)M34, M34(M33F1)M34, และ M34(M32F2)M34 มีค่าเท่ากับ 2.02±0.16, 1.67±0.28, 3.60±0.28 และ 2.17±0.15 kJ/m^2 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติพบว่ามีการเพิ่มขึ้นร้อยละ 289.19, 223.17, 595.38 และ 318.53 ตามลำดับ

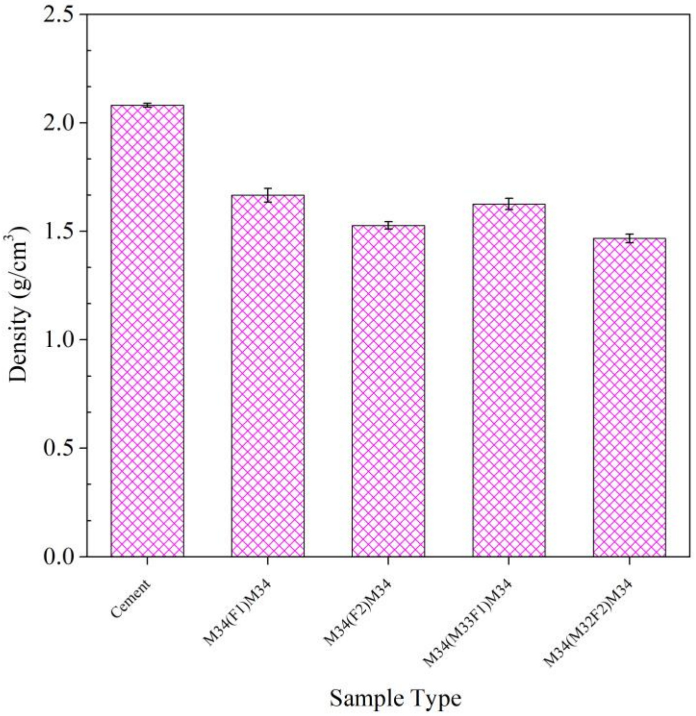
เมื่อพิจารณารูปที่ 76 (a-b) แสดงภาพ SEM ของซีเมนต์คอมโพสิต M34(M33F1)M34 พบว่าบริเวณรอยต่อของแต่ละชั้นมีความเข้ากันได้อย่างดีเนื่องจากบริเวณรอยต่อนั้นยังคงแสดงให้เห็นถึงการมี Microcrack ที่เคลื่อนที่มาหยุดที่เส้นใย ลักษณะเส้นใยที่ได้รับความเสียหาย การ Pull-out ของเส้นใย มีการกระจายตัวของเส้นใยมะพร้าวและอนุภาคขยะโฟมที่ดีมีการลอยตัวของขยะโฟมระหว่างชั้นที่น้อยส่งผลให้เส้นใยมะพร้าวนั้นสามารถเสริมแรงให้กับซีเมนต์เมทริกซ์ได้ดี

จากรูปที่ 76 (c-d) แสดงภาพ SEM ของซีเมนต์คอมโพสิต M34(F1)M34 พบว่าบริเวณรอยต่อของแต่ละชั้นมีความเข้ากันได้อย่างดีเนื่องจากบริเวณรอยต่อนั้นยังแสดงให้เห็นถึงการมี Microcrack ที่เคลื่อนที่มาหยุดที่เส้นใยมะพร้าว การ Pull-out ออกของเส้นใยรวมทั้งลักษณะเส้นใยที่ได้รับความเสียหาย และพบการลอยตัวของขยะโฟมระหว่างชั้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาแกนกลางยังพบ Air void บางพื้นที่ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลง



รูปที่ 76 ภาพ SEM ของโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวหลังจากการทดสอบการรับแรงกระแทก (a)-(b) M34(M33F1)M34, (c)-(d) M34(F1)M34

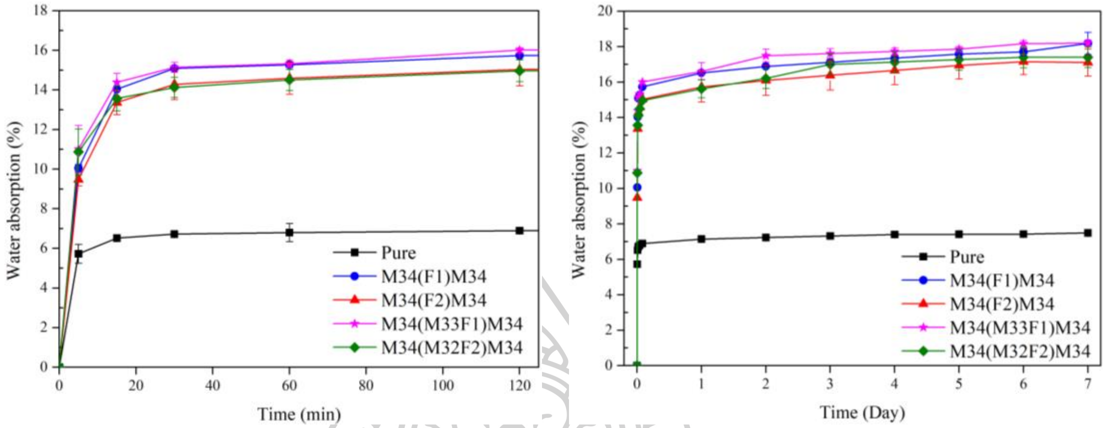
4.5.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น (Bulk density) ของโครงสร้างแซนด์วิชปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 77 กราฟแสดงค่า Bulk density ของโครงสร้างแซนด์วิชปูนซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

จากรูปที่77 พบว่าค่า Bulk density ของซีเมนต์เพสปกติเท่ากับ 2.08±0.01 g/cm^3 และค่า Bulk density ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว M34(F1)M34, M34(F2)M34, M34(M33F1)M34, และ M34(M32F2)M34 มีค่าเท่ากับ 1.67±0.03, 1.53±0.02, 1.63±0.03, และ 1.47±0.02 g/cm^3 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติพบว่ามีการลดลงร้อยละ19.99, 26.62, 21.88 และ 29.50 ตามลำดับ

4.5.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 78 ผลการดูดซึมน้ำของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

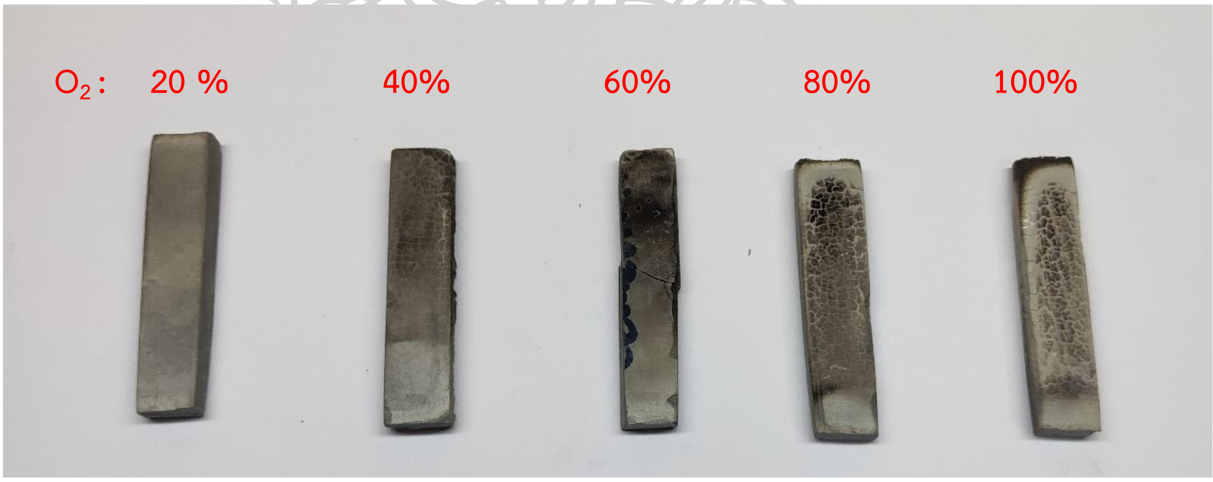
จากรูปที่ 78 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำซีเมนต์ (Water absorption) ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวหลังจากผ่านการบ่มในน้ำ 28 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของคอมโพสิตขยะโฟมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 1 และค่อยๆคงที่จากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงวันที่ 7 โดยซีเมนต์เพสปกติจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 7.48±0.18 เปอร์เซ็นต์พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ M34(F1)M34, M34(F2)M34, M34(M33F1)M34, และ M34(M32F2)M34 มีค่าเท่ากับ 18.18±0.63, 17.10±0.76, 18.21±0.17 และ 17.40±0.59 % ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติพบว่ามีการเพิ่มขึ้นร้อยละ 142.90, 128.54, 143.28 และ 132.51 ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าการทดลองตอนอื่นเกิดเนื่องจากการที่มีปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่สูงสำหรับชั้นที่ประกบถึงร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อชั้น ส่วนแนวโน้มในชั้นตรงกลางเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 3

การพัฒนาโครงสร้างแซนด์วิชระหว่างปูนซีเมนต์ผสมขยะโฟมมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและน้ำหนักที่เบาโดยการใช้ซีเมนต์คอมโพสิตที่มีส่วนประกอบของขยะโฟมไว้ด้านใน และใช้ซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าวเป็นตัวประกอบด้านนอกเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล สำหรับโครงสร้างแซนด์วิชทั้งหมดในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงค่า Flexural strength, Impact strength ที่มีค่าสูงค่าซีเมนต์เพสปกติ อีกทั้งขยะโฟมที่อยู่ด้านในนั้นส่งผลให้ค่า Bulk density และ Thermal conductivity ของคอมโพสิตทโดยรวมต่ำลง

4.6 การศึกษาสมบัติการต้านทานการติดไฟ

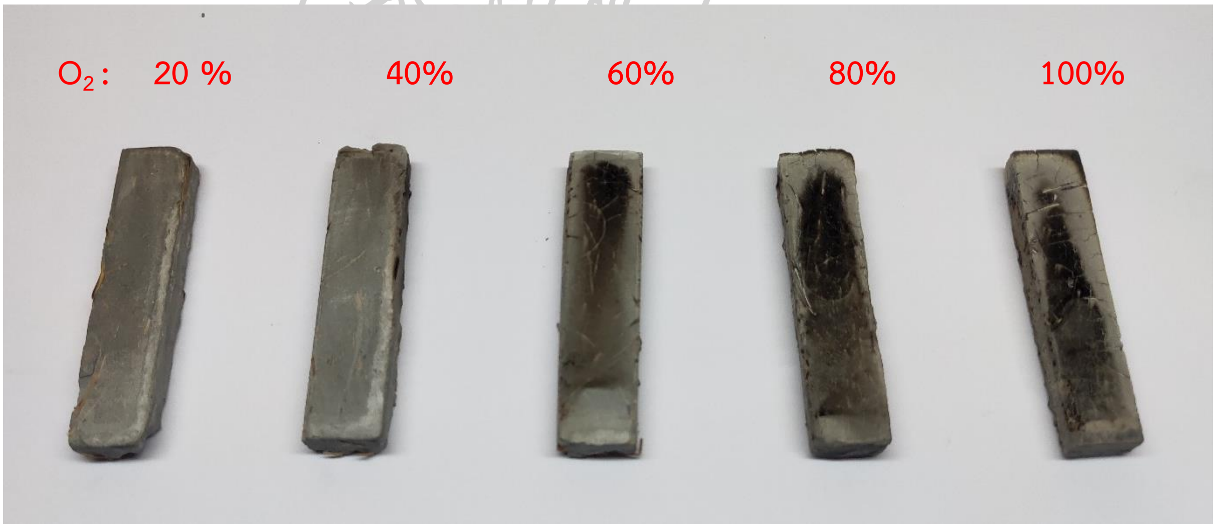
การทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ตามมาตรฐาน ASTM-D2863- 91 โดยทำการทดสอบที่ปริมาณแก๊สออกซิเจน 20 - 100 % อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %

รูปที่ 79 ชิ้นงานสูตร Cement ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI)



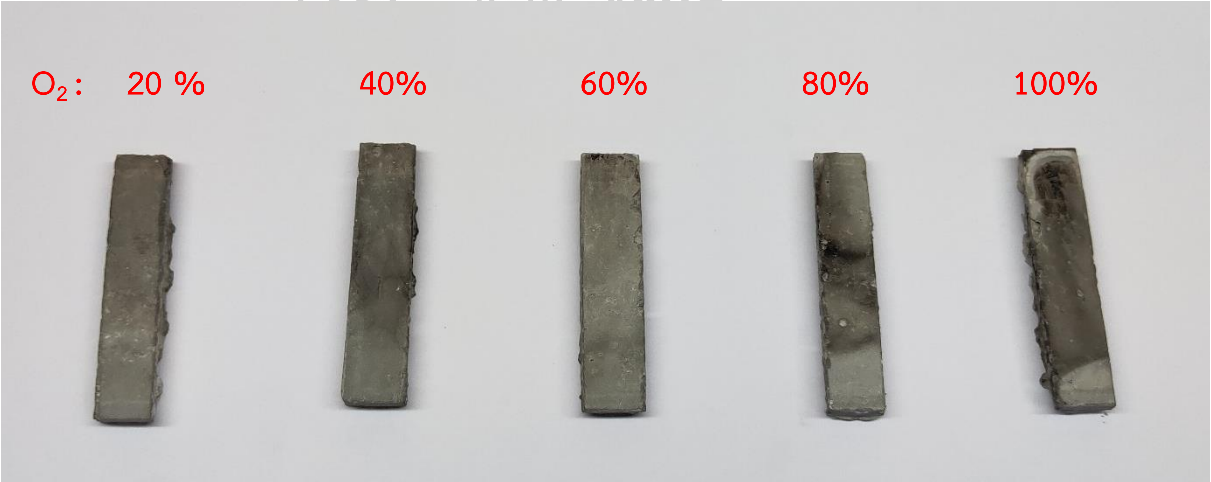
รูปที่ 80 ชิ้นงานสูตร Cement หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 %

รูปที่ 81 ชิ้นงานสูตร M34 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI)



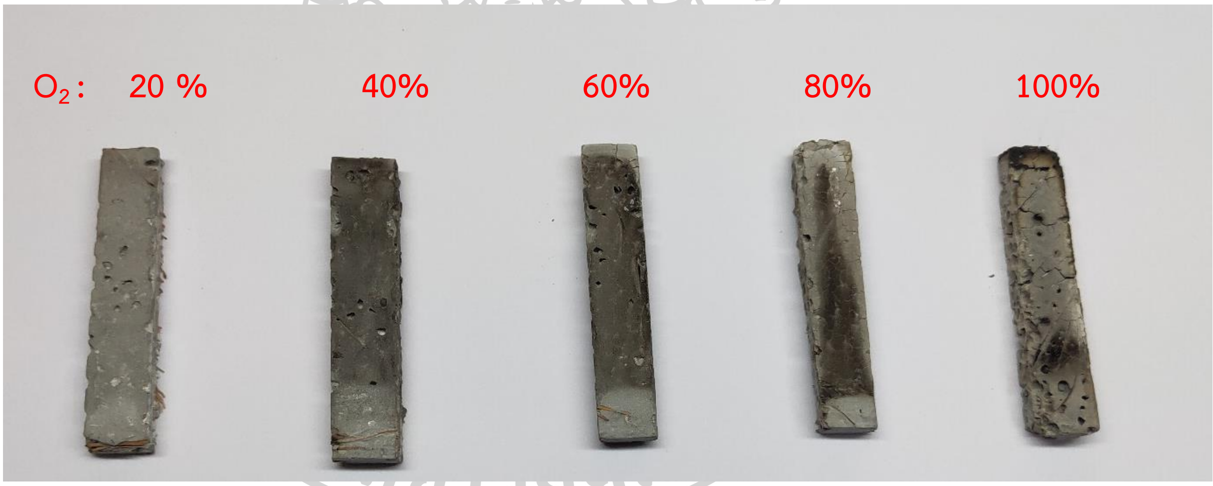
รูปที่ 82 ชิ้นงานสูตร M34 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 %

รูปที่ 83 ชิ้นงานสูตร F1 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI)



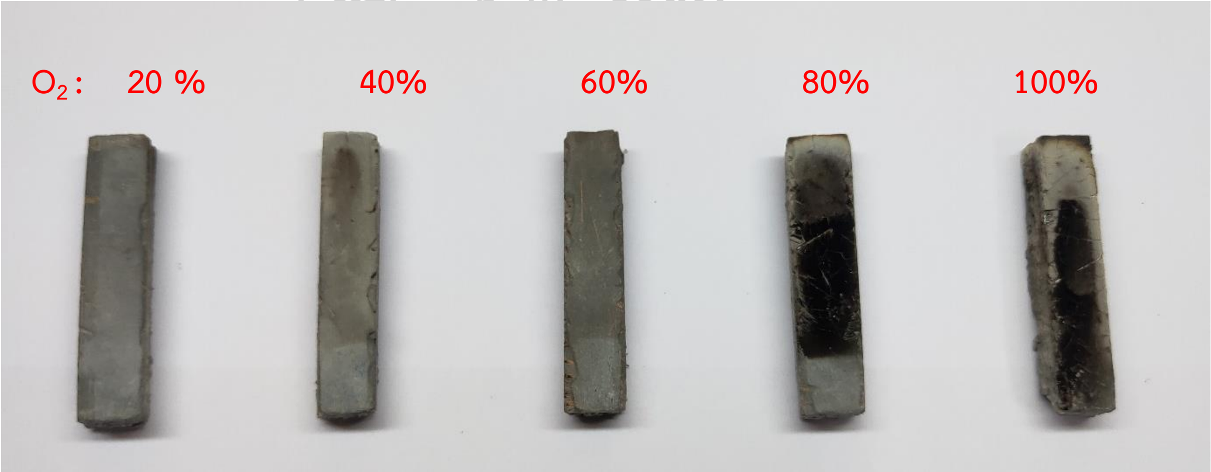
รูปที่ 84 ชิ้นงานสูตร F1 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 %

รูปที่ 85 ชิ้นงานสูตร M33F1 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI)



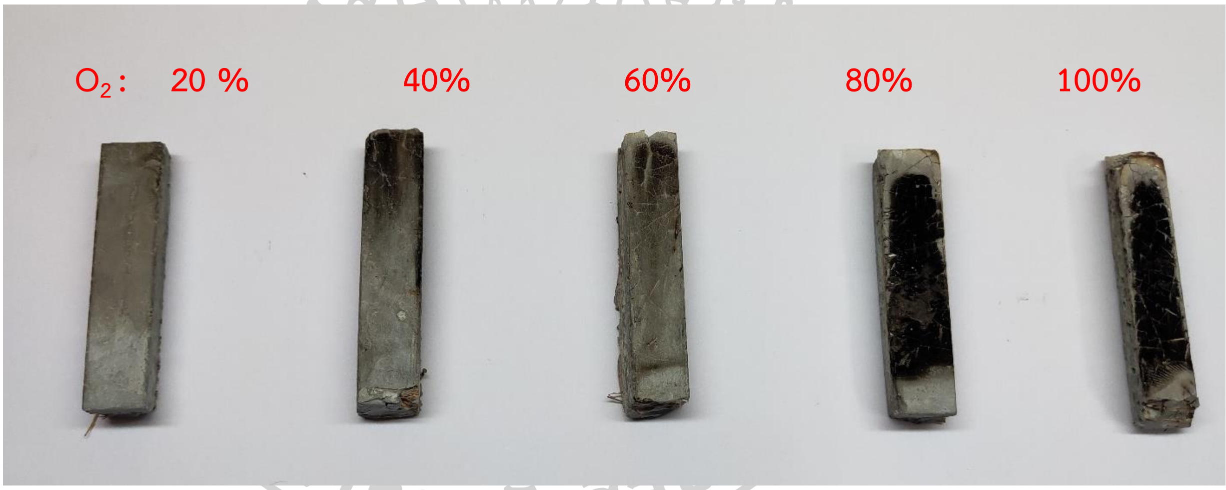
รูปที่ 86 ชิ้นงานสูตร M33F1 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 %

รูปที่ 87 ชิ้นงานสูตร M34(F1)M34 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI)



รูปที่ 88 ชิ้นงานสูตร M34(F1)M34 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ %O_2 เท่ากับ 20 -100 %

รูปที่ 89 ชิ้นงานสูตร M34(M33F1)M34 ก่อนทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI)



รูปที่ 90 ชิ้นงานสูตร M34(M33F1)M34 หลังทำการทดสอบ Limited oxygen index (LOI) ที่ $\%O_2$ เท่ากับ 20 -100 %

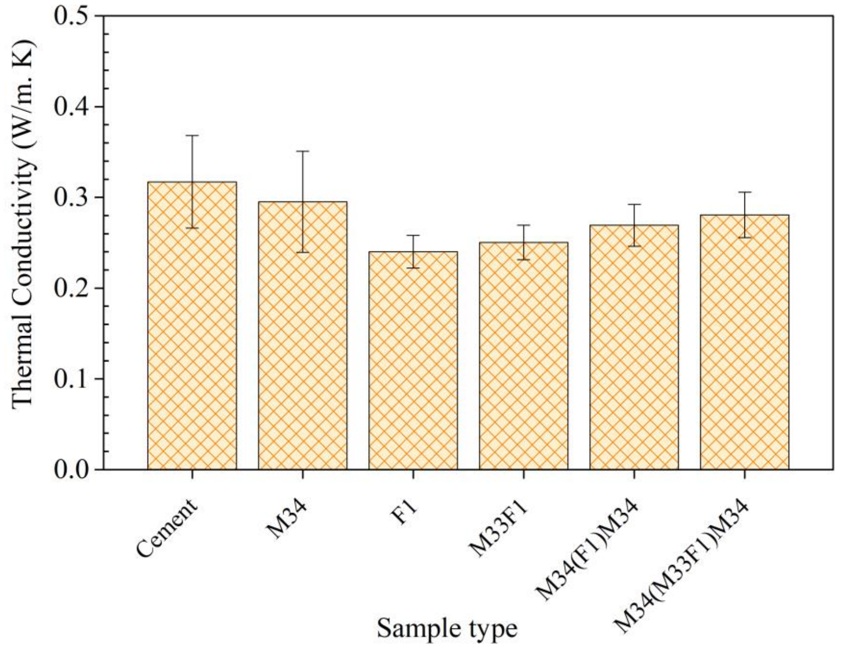
สำหรับ Cement, M34, M34(F1)M34 และ M34(M33F1)M34 เมื่อทำการทดสอบ Limiting Oxygen Index ที่ $\%O_2$ เท่ากับ 20 -100 % แสดงดังรูปที่ 80 82, 88, 90 พบว่าไม่เกิดการลามไฟ และมีเพียงรอยเขม่าดำ และสำหรับ M33F1 และ F1 ที่มีอนุภาคขยะโฟมอยู่ที่ผิวเมื่อทำการทดสอบ Limiting Oxygen Index ที่ $\%O_2$ เท่ากับ 20 -100 %แสดงดังรูปที่ 84, 86 พบว่ามีการสลายตัวของอนุภาคขยะโฟมที่ผิว มีรอยเขม่าดำ และไม่เกิดการลามไฟ

ซีเมนต์คอมโพสิตทั้งหมดจะเกิดเขม่าดำตรงบริเวณผิวของชิ้นงานเนื่องจากการเผาไหม้ของแก๊สหุงต้มที่ไม่สมบูรณ์ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงระยะทางที่เกิดการลุกไหม้ของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานได้มีการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงทำให้เกิดไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S), แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่มีเสถียรภาพในการสลายตัวทางความร้อนสูงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kroehong W.และคณะ [76] ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าผสมเถ้าชานอ้อย โดยมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยชานอ้อยร้อยละ 10 -30 โดยน้ำหนักและบ่มในน้ำ 28 วัน พบว่ามีการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่อุณหภูมิ 105 – 450 องศาเซลเซียส, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ที่อุณหภูมิ 450 – 580 องศาเซลเซียส และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่อุณหภูมิ 580 – 1,000 องศาเซลเซียส และแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มีอุณหภูมิสลายตัว 1,250 องศาเซลเซียส สำหรับการสลายตัวของเส้นใยมะพร้าวนั้นมีช่วงอุณหภูมิสลายตัวที่อุณหภูมิ 261-386 องศาเซลเซียส และขยะโฟมมีช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิ 390-437 องศาเซลเซียส สำหรับซีเมนต์คอมโพสิตทั้งหมดนี้ทำขึ้นเพื่อเป็นวัสดุภายในอาคารจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบการลุกติดไฟ การลามไฟ ในกรณีการเกิดอัคคีภัย ซึ่งปกติแล้วในบรรยากาศทั่วไปนั้นจะมีปริมาณออกซิเจน 21 % ซึ่งจากการทดสอบข้างต้นซีเมนต์คอมโพสิตทั้งหมดจะไม่เกิดการลุกติดไฟและไม่มีการลามไฟเกิดขึ้นจึงเหมาะสมสำหรับการทำวัสดุภายในอาคาร

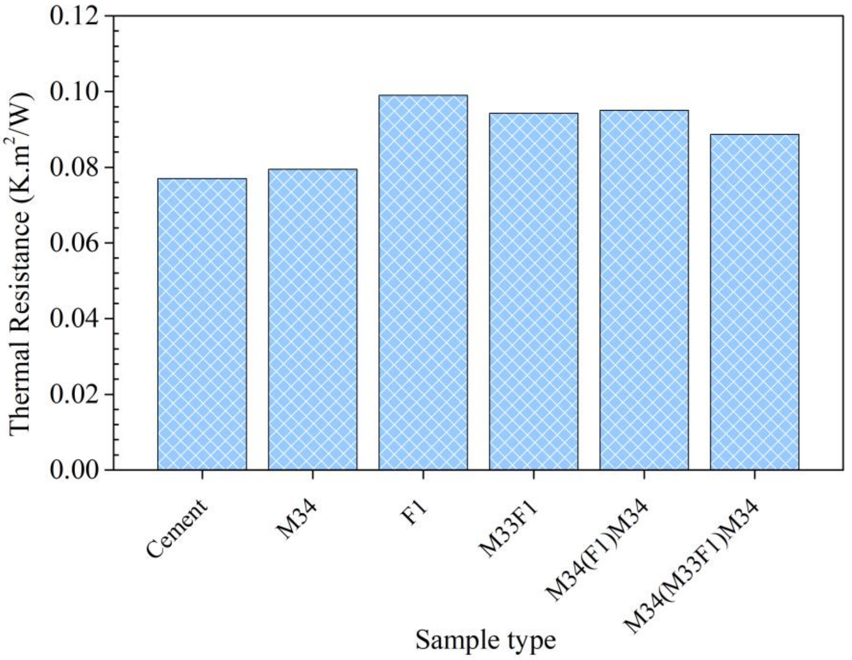
4.7 ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน (Thermal conductivity and thermal resistance)

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อน

Sample	Thermal conductivity (W/m·K)	Thermal resistance ($K{\cdot}m^2/W$)
Cement	0.3171 ± 0.0509	0.0770
M34	0.2951 ± 0.0658	0.0795
F1	0.2401 ± 0.0181	0.0990
M33F1	0.2503 ± 0.0190	0.0943
M34(F1)M34	0.2692 ± 0.0231	0.0950
M34(M33F1)M34	0.2808 ± 0.0251	0.0887



รูปที่ 91 ค่า Thermal conductivity ของซีเมนต์คอมโพสิต



รูปที่ 92 ค่า Thermal resistance ของซีเมนต์คอมโพสิต

ตารางที่ 15 และรูปที่ 91 แสดงค่า Thermal conductivity ของโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าวในสัดส่วนที่ต่างกัน สำหรับซีเมนต์เพสปกติพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.317±0.05 W/m·K สำหรับซีเมนต์คอมโพสิตเส้นใยมะพร้าว M34 นั้นมีค่าลดลงร้อยละ 6.94 เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวนั้นภายในจะมีท่อน้ำเลี้ยงกลวงมีอากาศบรรจุอยู่ซึ่งมีความเป็นฉนวนความร้อน แต่การผสมเส้นใยมะพร้าวนั้นส่งผลต่อการลดลงของค่า Thermal conductivity ในซีเมนต์คอมโพสิตที่น้อยกว่าขยะโฟมซึ่งการผสมขยะโฟมนั้นทำให้ค่า Thermal conductivity นั้นมีแนวโน้มลดลงสำหรับ F1, M33F1, M34(F1)M34 และ M34(M33F1)M34 โดยมีการลดลงร้อยละ 24.28, 21.06, 15.10 และ 11.45 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสปกติ ซึ่งอาจเกิดจากอนุภาคของขยะโฟมนั้นมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิดซึ่งภายในมีอากาศบรรจุอยู่ซึ่งมีค่า Thermal conductivity ที่ต่ำกว่าองค์ประกอบอื่น ความเป็นฉนวนของเนื้อพลาสติกพอลิสไตรีน และการเพิ่มปริมาณของขยะโฟมนั้นจะทำให้ค่า Thermal conductivity ต่ำลงซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับงานวิจัยของ Shams [77-79]

เมื่อพิจารณาแล้วเห็นว่าค่า Thermal conductivity จะแปรผันตรงกับค่า Bulk density โดยที่ซีเมนต์คอมโพสิตที่มีค่า Bulk density ต่ำค่า Thermal conductivity ก็จะต่ำส่วนที่มีค่า Bulk density สูงค่า Thermal conductivity ก็จะสูงเช่นกันซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยมะพร้าวนั้นมีค่า Thermal conductivity ที่ต่ำตลอดจนการจัดเรียงตัวแบบสุ่มในการขึ้นรูปคอมโพสิตนั้นยังก่อให้เกิด Air-void โดยมีส่วนช่วยเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อน

สำหรับค่า Thermal resistance ของซีเมนต์คอมโพสิตนั้นแสดงในตารางที่ 15 และรูปที่ 92 จะแปรผกผันกับค่า Thermal conductivity สำหรับงานวิจัยนี้ค่า Thermal resistance ของ Cement มีค่าเท่ากับ 0.077 $K.m^2/W$ และสำหรับซีเมนต์คอมโพสิต M34, F1, M33F1, M34(F1)M34 และ M34(M33F1)M34 มีค่าที่เพิ่มขึ้นจากซีเมนต์ร้อยละ 3.25, 28.57, 22.47, 23.38 และ 15.19 ตามลำดับ

4.8 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับงานวิจัยอื่น ๆ

ตารางที่ 16 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับงานวิจัยอื่น ๆ

Sample	Composition	Flexural strength (MPa)	Impact strength (kJ/m^2)	Bulk density (kJ/cm^3)	Thermal conductivity (W/m·K)	Water absorption (%) 7 day
M34	C+M	13.25	7.06	1.81	0.2951	10.25
F1	C+EPS	2.96	0.34	1.43	0.2401	6.02
M33F1	C+M+EPS	6.65	3.35	1.24	0.2503	7.34
M34(M33F1)M34	C+M+EPS (layer)	9.65	3.60	1.63	0.2692	18.21
Brose [80]	C+S+ FA +M	4.55	-	1.52	0.1680	-
Sakool [45]	C+M	4.92	-	-	0.6210	16.00
Kochova [81]	C+M(tread)	5.50	-	0.60	0.1500	-
Lin[82]	C+Pulp	15.00	1.90	1.32	-	-
Chakraborty [83]	C+S+Jute	9.00	-	2.22	-	-
Coutts [84]	C+Abaca	27.30	4.79	1.81	-	24.80
Petrella [85]	C+Foam	1.10	-	0.94	-	-
Gutiérrez [86]	C+Urethane foam	3.50	-	1.32	0.3060	36.40
Holmer [87]	C+ Pinus radiata +kraft	21.10	0.73	1.71	-	19.00
Holmer [87]	C+Banana kraft	16.8	0.24	1.73	-	16.70
Asasutjarit [50]	C+M (tread)	-	-	1.13	0.4000	19.86
Hwang [37]	C+FA+S+GBFS+M	74.00	-	2.14	-	8.00
Sathiparan [88]	C+L+S+M	1.00	-	1.90	-	17.00
Santos [89]	C+F+S+Sisal	4.12	-	1.76	-	-
	C+F+S+Piassava	2.06	-	1.76	-	-
Lertwattanaruk	C+S+L+M (tread)	10.18	-	2.10	0.4100	4.67
[60]	C+S+L+plam(tread)	8.36		2.03	0.4000	3.88

*** C =Cement, FA= Fly ash, S=Natural sand, M = Coconut coir, GBFS =Ground blast furnace slag, L=Lime

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.9 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับทางการค้า

ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบซีเมนต์คอมโพสิตที่พัฒนากับทางการค้า

Sample	Composition	Flexural Strength (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)	Bulk density (kJ/cm^3)	Thermal conductivity (W/m·K)	Water absorption (%) 7 day
M34	C+M	13.25	7.06	1.81	0.2951	10.25
F1	C+EPS	2.96	0.34	1.43	0.2401	6.02
M33F1	C+M+EPS	6.65	3.35	1.24	0.2503	7.34
M34(M33F1)M34	C+M+EPS (layer)	9.65	3.60	1.63	0.2692	18.21
Commercial A [90]		11.42	2.43	1.40	0.1500*	11.29
Commercial B [91]		13.25	1.98	1.30	0.1000*	12.00
Commercial C [92]		2.04	2.01	0.78	-	17.06

* สำหรับค่า Thermal conductivity เป็นค่าที่ได้จากแหล่งอ้างอิง

จากตารางที่ 17 สำหรับการพัฒนาซีเมนต์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้ M34 นั้นแสดงให้เห็นถึงค่า Flexural strength ที่เทียบเคียงได้กับ Commercial A และยังสูงกว่า Commercial B และ C สำหรับ M34, M33F1 และแซนด์วิช M34(M33F1)M34 แสดงค่า Impact strength ที่มีค่าสูงกว่า Commercial ทั้ง 3 ชนิดอีกทั้งยังมีค่า Water absorption ที่ต่ำกว่าอีกด้วย สำหรับค่า Bulk density นั้น M33F1 มีค่าเทียบเคียงได้กับ Commercial A สำหรับค่า Thermal conductivity ของ Commercial ทั้ง 3 ชนิดมีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์ที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นจุดที่ต้องปรับปรุง และพัฒนาต่อไป

สำหรับการพัฒนาซีเมนต์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยมีเป้าประสงค์ที่พัฒนาซีเมนต์คอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลที่สูง น้ำหนักเบา การใช้ของเสียทางอุตสาหกรรม และเป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อม ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาซีเมนต์คอมโพสิตกับมะพร้าวซึ่งสูตรที่เหมาะสมคือ M34 นั้นจะมีความโดดเด่นในด้านการรับแรงดัด แรงกระแทก ซึ่งสอดคล้องกับค่า Flexural strength และ Impact strength ที่สูงแต่ด้อยคือการมีค่า Thermal resistance ที่ต่ำและความหนาแน่นที่ยังมีค่าสูงอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาซีเมนต์คอมโพสิตกับขยะโฟมเพื่อพัฒนาค่า Thermal resistance ให้สูงขึ้นและมีความหนาแน่นที่ลดลงซึ่งสูตรที่ยอมรับได้ก็คือ F1 และ F2 ซึ่งมีค่า Thermal resistance ที่สูงและมีความหนาแน่นที่ต่ำ แต่มีข้อด้อยคือการรับแรงดัด แรงกระแทกนั้นมีค่าที่ต่ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำลักษณะที่โดด

เด่นของเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟมมารวมเข้าด้วยกันจึงเกิดเป็นซีเมนต์คอมโพสิตที่มีความโดดเด่นในด้านการรับแรงดัด แรงกระแทก แต่ยังมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำและมี Thermal resistance ที่สูงซึ่งสูตรที่ได้คือ M34F1, M43F1 อีกทั้งผู้วิจัยยังซีเมนต์คอมโพสิตที่มีความโดดเด่นในแต่ละด้านนำมาเรียงเป็นโครงสร้างแซนด์วิชเพื่อพัฒนาสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้นมีค่า Thermal resistance ที่สูงขึ้นและมีความหนาแน่นที่ต่ำจึงได้สูตรที่เหมาะสมคือ M34(M33F1)M34 และ M34(F1)M34 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการพัฒนาซีเมนต์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 16 และ 17 อีกทั้งยังสามารถเทียบเคียงได้กับแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ขายตามท้องตลาดทั่วไป (Commercial) ได้อีกด้วย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ เส้นใยมะพร้าว และขยะโฟมสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงและทดแทนซีเมนต์ในการพัฒนา Lightweight cement board ที่มีสูตรผสมที่ต่างกันซึ่งสรุปได้ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาผลของขนาดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตพบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเส้นใยมะพร้าวปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่า Flexural strength, Impact strength และ Water absorption มีค่าเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ค่า Bulk density และThermal conductivity ของซีเมนต์คอมโพสิตลดลง ในงานวิจัยนี้ความยาวและปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยมะพร้าวคือ 3 เซนติเมตร และปริมาณ 4 %โดยน้ำหนัก โดยหากความยาวของใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นอีกจะส่งผลให้ค่า Flexural strength และ Impact strength ของซีเมนต์คอมโพสิตลดลง

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของปริมาณโฟมที่มีต่อสมบัติวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตพบว่าเมื่อแทนที่ขยะโฟมในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Flexural strength, Impact strength, Water absorption, Bulk density และ Thermal conductivity ของซีเมนต์คอมโพสิตลดลง ในงานนี้ปริมาณโฟม EPS ที่เหมาะสมคือ 1 % โดยน้ำหนัก

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะโฟมและเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติซีเมนต์คอมโพสิต

การรวมกันของเส้นใยมะพร้าว และขยะโฟมนั้นสามารถปรับปรุงค่า Flexural และ Impact strength และลดค่า Bulk density สำหรับค่า Flexural strength และ Impact strength ที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการเติมเส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์คอมโพสิต ในขณะที่การเติมขยะโฟมนั้นจะช่วยลด Bulk density และ Thermal conductivity แต่ขยะโฟมนั้นจะทำให้ค่า Flexural strength และ Impact strength ในซีเมนต์คอมโพสิตลดต่ำลงซึ่งสามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มเส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์คอมโพสิต

ตอนที่ 4 การศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม และเส้นใยมะพร้าว

สำหรับโครงสร้างแซนด์วิชซีเมนต์มีสมบัติเชิงกลที่ได้รับการปรับปรุงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์คอมโพสิตที่มีการรวมกันระหว่างเส้นใยมะพร้าวและขยะโฟม, Cement และซีเมนต์คอมโพสิตขยะโฟม

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิต Lightweight cement ที่มีค่า Flexural strength และ Impact strength ที่แตกต่างกัน โดยซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยมะพร้าว 3% และ 1% ขยะโฟมโดยน้ำหนักที่ความยาวเส้นใยมะพร้าว 3 เซนติเมตรหรือ M33F1 สามารถผลิตได้ในอุตสาหกรรม

สมบัติเชิงความร้อน และการลามติดไฟ

สำหรับซีเมนต์คอมโพสิตทั้งหมดในงานวิจัยนี้เมื่อทดสอบค่า Limited oxygen index (LOI) พบว่าไม่มีการลุกติดไฟ หรือมีการลามไฟ การแทนซีเมนต์ด้วยเส้นใยมะพร้าวส่งผลทำให้ค่า Thermal conductivity ของซีเมนต์คอมโพสิตลดต่ำลงเล็กน้อยแต่การแทนที่ซีเมนต์ด้วยขยะโฟมส่งผลทำให้ค่า Thermal conductivity ของซีเมนต์คอมโพสิตลดลงอย่างมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1.ควรมีการใช้เครื่องอัดไฮโดรลิคในการขึ้นรูปซีเมนต์

2. ควรมีการศึกษาการใช้เส้นใยสังเคราะห์ขนาดเล็กร่วมด้วย

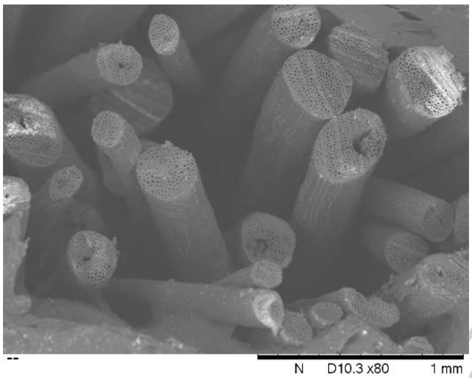
3.ควรมีการศึกษาเส้นใยชนิดอื่น เช่น ใยกระดาษ ปาล์ม และ ชานอ้อย

ภาคผนวก ก

การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยซอฟต์แวร์ Image J

ตารางที่ ก-1 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมะพร้าว

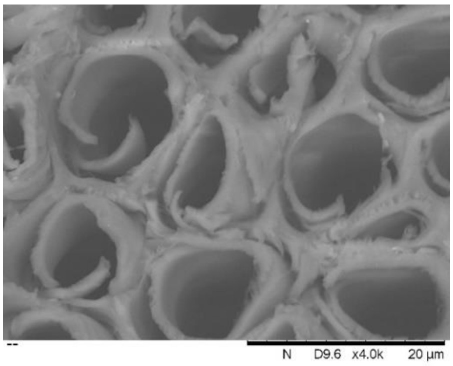
เส้นที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)
1	284
2	220
3	157
4	368
5	155
6	235
7	320
8	322
9	311
10	165
11	163
12	277
13	349
14	218
15	246
16	194
17	163
18	131
19	121
20	101
เฉลี่ย	225
SD	81.19



รูปที่ ก-1 ลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ก-2 เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำเลี้ยงเส้นใยมะพร้าว

วงที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)
1	10.14
2	12.70
3	6.31
4	14.03
5	13.14
6	9.15
7	10.18
8	10.86
เฉลี่ย	10.81
SD	2.49



รูปที่ ก-2 ลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำเลี้ยงของเส้นใยมะพร้าว

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ข

ค่าสมบัติเชิงกลของซีเมนต์คอมโพสิต

ตาราง ข-1 ค่า Flexural strength ของซีเมนต์คอมโพสิต

ชิ้นงาน	Flexural strength (MPa)	SD
Cement	3.74	0.18
M11	4.70	0.24
M12	4.96	0.41
M13	6.08	0.40
M14	6.52	0.29
M21	4.44	0.41
M22	4.75	0.33
M23	5.96	0.46
M24	8.65	0.65
M31	4.88	0.66
M32	5.28	0.54
M33	7.24	0.44
M34	13.24	1.85
M41	4.13	0.42
M42	4.86	0.43
M43	8.05	0.72
M44	10.02	0.88
F1	2.96	0.27
F2	2.06	0.22
F3	1.21	0.18
F4	1.12	0.12
M33F1	6.65	0.59
M32F2	3.15	0.86
M31F3	1.29	0.29
M43F1	6.22	0.88
M42F2	3.56	0.06
M41F3	1.58	0.38
M34(F1)M34	8.86	0.66
M34(F2)M34	6.36	0.37
M34(M33F1)M34	9.65	1.90
M34 (M32F2)M34	6.93	0.65

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตาราง ข-2 ค่า Impact strength ของซีเมนต์คอมโพสิต

ชิ้นงาน	Impact strength (kJ/m^2)	SD
Cement	0.52	0.05
M11	0.88	0.04
M12	1.64	0.47
M13	2.62	0.27
M14	4.19	0.42
M21	0.90	0.13
M22	1.92	0.33
M23	4.22	0.21
M24	4.80	0.37
M31	1.38	0.31
M32	2.67	0.12
M33	5.35	0.16
M34	7.06	0.57
M41	1.49	0.41
M42	2.86	0.08
M43	4.94	0.38
M44	6.19	0.17
F1	0.34	0.03
F2	0.35	0.05
F3	0.38	0.03
F4	0.44	0.02
M33F1	3.35	0.41
M32F2	1.21	0.37
M31F3	0.70	0.02
M43F1	1.56	0.35
M42F2	1.07	0.10
M41F3	0.84	0.11
M34(F1)M34	2.02	0.16
M34(F2)M34	1.67	0.28
M34(M33F1)M34	3.60	0.28
M34(M32F2)M34	2.17	0.15

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตาราง ข-3 ค่า Bulk density ของซีเมนต์คอมโพสิต

ชิ้นงาน	Density (g/cm^3)	SD
Cement	2.08	0.009
M11	1.97	0.016
M12	1.92	0.015
M13	1.85	0.011
M14	1.81	0.019
M21	1.95	0.011
M22	1.90	0.016
M23	1.84	0.016
M24	1.81	0.011
M31	1.95	0.016
M32	1.90	0.029
M33	1.85	0.011
M34	1.81	0.006
M41	1.97	0.013
M42	1.90	0.015
M43	1.84	0.007
M44	1.82	0.010
F1	1.43	0.037
F2	1.02	0.052
F3	0.73	0.042
F4	0.54	0.050
M33F1	1.24	0.023
M32F2	0.86	0.014
M31F3	0.63	0.011
M43F1	1.08	0.034
M42F2	0.86	0.036
M41F3	0.62	0.016
M34(F1)M34	1.67	0.032
M34(F2)M34	1.53	0.017
M34(M33F1)M34	1.63	0.026
M34(M32F2)M34	1.47	0.020

ตาราง ข-4 ค่า Water absorption (%) ของซีเมนต์คอมโพสิต

Hour	Cement	M11	M12	M13	M14	M21	M22	M23	M24
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.08	5.72	6.34	6.18	5.68	7.17	7.67	8.09	6.75	8.46
0.25	6.51	6.67	7.35	7.58	7.84	8.10	8.37	7.13	8.59
0.5	6.72	6.84	7.60	7.92	8.08	8.28	8.39	7.29	9.16
1	6.80	7.00	7.73	8.12	8.27	8.47	8.63	7.46	9.33
2	6.89	7.09	7.88	8.27	8.40	8.52	8.78	7.71	9.51
24	7.14	7.34	8.16	8.69	8.82	8.82	9.12	8.14	10.12
48	7.23	7.43	8.26	8.77	9.00	8.89	9.21	8.24	10.34
72	7.31	7.51	8.32	8.85	9.13	8.95	9.30	8.33	10.47
96	7.40	7.59	8.38	8.92	9.26	9.02	9.40	8.43	10.59
120	7.41	7.67	8.44	9.00	9.39	9.10	9.45	8.54	10.72
144	7.42	7.69	8.55	9.17	9.53	9.11	9.50	8.59	10.81
168	7.48	7.73	8.58	9.19	9.52	9.14	9.54	8.70	10.79

Hour	M31	M32	M33	M34	M41	M42	M43	M44
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.08	3.36	6.15	6.73	7.98	6.18	7.23	7.28	7.59
0.25	6.15	7.43	8.10	8.44	7.30	7.53	7.72	8.17
0.5	6.71	7.67	7.98	8.66	7.47	7.73	7.86	8.24
1	6.91	7.84	8.20	8.82	7.62	7.85	7.98	8.44
2	7.07	8.04	8.39	8.99	7.76	8.03	8.19	8.57
24	7.37	8.40	8.97	9.60	8.04	8.43	8.65	9.13
48	7.44	8.49	9.10	9.71	8.11	8.54	8.88	9.26
72	7.51	8.57	9.22	9.85	8.18	8.65	9.12	9.36
96	7.58	8.66	9.35	9.98	8.25	8.76	9.36	9.46
120	7.61	8.72	9.40	10.11	8.37	8.81	9.43	9.56
144	7.69	8.78	9.53	10.22	8.36	8.82	9.44	9.70
168	7.70	8.86	9.64	10.25	8.41	8.90	9.49	9.73

Hour	F1	F2	F3	F4	M33F1	M32F2	M31F3
0	0	0	0	0	0	0	0
0.08	4.15	2.84	3.69	2.50	4.49	4.63	3.58
0.25	5.27	3.67	4.12	2.94	5.85	5.25	4.09
0.5	5.39	4.31	4.20	3.03	6.03	5.35	4.26
1	5.41	4.79	4.23	3.11	6.18	5.41	4.24
2	5.53	5.05	4.26	3.11	6.38	5.53	4.30
24	5.73	5.20	4.38	3.24	6.70	5.84	4.49
48	5.76	5.27	4.46	3.35	6.81	5.91	4.53
72	5.80	5.35	4.54	3.47	6.84	5.92	4.63
96	5.83	5.43	4.61	3.58	6.96	5.99	4.71
120	5.90	5.56	4.71	3.76	7.07	6.06	4.79
144	5.97	5.55	4.76	3.78	7.18	6.14	4.87
168	6.03	5.61	4.88	3.87	7.34	6.43	5.12

Hour	M43F1	M42F2	M41F3	M34(F1)M34	M34(F2)M34	M34(M33F1)M34	M34(M32F2)M34
0	0	0	0	0	0	0	0
0.08	5.51	4.25	4.60	10.05	9.48	11.01	10.87
0.25	6.05	5.07	4.70	14.03	13.37	14.38	13.56
0.5	6.19	5.17	4.75	15.08	14.28	15.15	14.12
1	6.17	5.24	4.81	15.27	14.59	15.32	14.50
2	6.28	5.37	4.84	15.74	15.04	16.01	14.96
24	6.60	5.63	4.94	16.52	15.72	16.60	15.62
48	6.75	5.73	5.13	16.88	16.10	17.49	16.21
72	6.76	5.75	5.16	17.12	16.38	17.61	17.00
96	6.91	5.83	5.24	17.35	16.66	17.74	17.13
120	7.06	5.90	5.31	17.58	16.95	17.86	17.27
144	7.21	5.98	5.39	17.70	17.15	18.16	17.40
168	7.30	6.15	5.57	18.18	17.11	18.21	17.40

The Center of Building Innovation and Technology

ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร
Center of Building Innovation and Technology
ที่อยู่ : ชั้น 6 ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว
เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
Address: 6 th Floor Faculty of Architecture Kasetsart University 50 Ngamwongwan, Latyao,
Jatujak, Bangkok 10900 Tel: (662) 942 8960-3 #202 Fax.: (662) 940 5413
Website: www.cbit.arch.ku.ac.th/home

TEST REPORT FOR THERMAL CONDUCTIVITY (K) (ASTM C518)

OWNER : คุณ ชนินทร ภูศรี / ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

TESTED BY: THANAPHAT DATED: 20/05/2020 CERT NO.: 2005015 PAGE: 1/1

NO. OF SAMPLE / TOTAL NO. OF TEST SPECIMEN: 6/18

Operating Temperature 23 ± 2°C, Relative Humidity 50 ± 5 %RH

UNCERTAINTY OF TEST : ± 0.005 W/m.K

Sample Type	Thermal Conductivity (W/m.K)				
	Thickness (m)	Test Temp (°C)	Test Temp (°C)	K-Value (W/m.K)	R-Value (m^2.K/W) 'Calculated'
Cement (C)	0.0227 ± 0.0006	20 °C	50 °C	0.3171 ± 0.0509	0.0770
C - M34	0.0252 ± 0.0005	20 °C	50 °C	0.2951 ± 0.0658	0.0795
C - M33F1	0.0236 ± 0.0002	20 °C	50 °C	0.2503 ± 0.0190	0.0943
C - M34F1M34	0.0256 ± 0.0002	20 °C	50 °C	0.2692 ± 0.0231	0.0950
C - M34M33F1M34	0.0249 ± 0.0004	20 °C	50 °C	0.2808 ± 0.0251	0.0887
C - F1	0.0238 ± 0.0001	20 °C	50 °C	0.2401 ± 0.0181	0.0990

Remark : 1). K-Value is the thermal conductivity of sample @ thickness.
2). Certification applies to the test sample only.

Checked by [signature]
(Ms. Kanokon Hancharoen)
Metrologist

ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร
The Center of Building Innovation and Technology

Approved by [signature]
(Dr. Parames Kamhangrittirong)
Director of CBIT
Center of Building Innovation & Technology

รูปที่ ข-1 ค่าการทดสอบ Thermal conductivity และ Thermal resistance

ภาคผนวก ค

Proceeding งานประชุมวิชาการที่ได้เข้าร่วม

ICMARI

The International Conference on Materials Research and Innovation (ICMARI) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **773** (2020) 012055 doi:10.1088/1757-899X/773/1/012055

Performance of lightweight cement board using coconut coir fiber and expanded polystyrene foam waste

C Pusri[1], B Ksapabutr[1,2], N Chaiyut[1] and M Panapoy[1,2,*]

[1] Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.
[2] Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

*Corresponding author: mpanapoy@gmail.com, panapoy_m@su.ac.th

Abstract. Lightweight cement hybrid materials based on expanded polystyrene (EPS) foam waste and coconut coir fiber (CF) have been developed as an effective method for industrial and agricultural wastes management. The purpose of this study is to investigate the effects of CF and EPS foam as cement replacements at various proportions of EPS foam and CF at various lengths of CF on the properties of cement composites. The mixtures containing partial replacement of cement by 1, 2 and 3% CF with three different CF lengths (1, 2 and 3 cm) and 1, 2 and 3% EPS foam were prepared. The physical and mechanical properties of the specimens were determined after 28 days of hydration. The flexural strength and impact strength of the composites increased with CF content. Meanwhile, the bulk density clearly decreased along with the addition of EPS foam. The cement composites containing 3% CF and 1% EPS as well as 2% CF and 2% EPS at 2 cm fiber length showed acceptable strengths and density for structural lightweight cement. The results indicated that EPS foam and CF can be used as replacements for cement and asbestos in the production of fiber board cement to obtain inexpensive, lightweight and strong product.

1. Introduction

Nowadays, cement board is one of the most widely used construction materials. The most common type of fiber cement is asbestos cement. The major attractions of asbestos cement products to the users are durability and cost-effectiveness. However, asbestos fibers are carcinogenic. Alternatively, there are other types of organic or inorganic fibers, which are safer to human health [1]. The rapid growth of urbanization and industrialization has generated huge amounts of industrial and agricultural wastes. A circular economy in recycling and waste management is a systematic approach to minimize the problem. In this regard, the use of industrial and agricultural wastes should be considered in attempt to develop new cement board composites. Many researchers have shown several advantages in using natural fibers in cement composites: increased impact strength, increased flexural strength, and decreased bulk density [2-3]. Coconut fiber has one of the highest lignin contents, making it stronger than other natural fibers [2]. For industrial wastes, EPS is mainly used as an insulating or packaging material in various industrial fields. A large number of EPS is consumed, and is disposed as a waste, whilst the availability of mechanical test results will extend EPS geofoam to geotechnical applications, contributing to decreasing the amount of EPS ending up in landfills and more sustainable infrastructure systems [4]. The natural fiber reinforced concrete and EPS concrete have been separately studied in previous works; but until

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.
Published under licence by IOP Publishing Ltd

The International Conference on Materials Research and Innovation (ICMARI) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **773** (2020) 012055 doi:10.1088/1757-899X/773/1/012055

now, the study is carried out with combination of CF and EPS in cement board. Therefore, the current study presented herein is an attempt to develop lightweight EPS/CF/cement composite with considerable flexural and impact strengths. The influence of EPS foam from waste material in packaging industry and CF as cement and asbestos replacements at different weight contents of EPS foam and CF at different CF lengths on the physical and mechanical properties of fiber cement board was investigated.

2. Experimental

2.1. Materials and specimen preparation

Type I Portland cement satisfying the requirements of ASTM C150 was supplied by Siam Cement Group Company. In this work, CF was brown fiber obtained from Suphan Buri, Thailand. The raw materials were washed with distilled water to remove impurities and then dried at 60°C for 24 h. The cleaned CF with 0.14 mm diameter were then cut into 1, 2 and 3 cm length. Recycled EPS waste from electronics packaging was used. The cleaned EPS waste was ground to reduce the particle size to < 3 mm. All specimens test setup was developed with acrylic mold dimension of 12 cm in length, 5 cm in width and 5 mm in depth. The specimens were removed from the mold after 24 h and then kept in water for 28 days before the test date. In this study, various mixtures were produced by substituting cement with 1, 2 and 3% CF with three different fiber lengths (1, 2 and 3 cm) and/or 1, 2 and 3% EPS foam. The sample name was abbreviated as $C_{xy}E_z$, where the wt% of CF, the fiber length of CF (cm), and the wt% of EPS were denoted as x, y, z, respectively. Meanwhile, CF and EPS were given notation as C and E in the sample name.

2.2 Characterization and testing method

The tests were undertaken in accordance with BS EN 12467:2012 (Fibre-cement flat sheets-Product specification and test methods). The bending test was performed to investigate flexural behaviour of the specimens using the Instron 5965 50kN universal testing machine by the three-point bending tests, whose displacement control rate and span were 2 mm/min and 75 mm, respectively. An Instron CEAST 9050 impact pendulum machine was used to evaluate the impact behaviour of the specimens. The bulk density of the specimens was measured using a density kit (Mettler Toledo) mounted on a precision balance. The morphology of CF, EPS raw materials and the composites was characterized using a Hitachi TM3030 SEM.

3. Results and discussion

The SEM images of EPS and CF wastes are presented in Figures 1(a) and (b), respectively. The morphology of EPS revealed hollow and closed-cellular foam structure, that plays an important role in its properties. CF showed a rough surface morphology with irregular shape. Figures 1(c)-(f) demonstrate the SEM images of the fractured surface for EPS cement and CF cement composites after impact test. It can be seen that there was a small gap between EPS and cement matrix which means a weak adhesion for 3 wt% EPS. The gap formed was probably caused by incomplete wettability between cement and EPS during the composite fabrication (Figures 1(c)-(d)). This was also reported by other literatures [5]. Meanwhile, a better interfacial bonding is observed between CF and cement for the CF cement composite and thereby found relatively little fiber pull-out with a rough interface and more effectively bridge microcracks within the CF cement composite (Figures 1(e)-(f)). Probably because physical interlocking and hydrogen bonds could form between fiber and cement matrix during the hydration of cement [6]. The results of the physical and mechanical tests of EPS cement and CF cement composites are shown in Figure 2. The bulk density of plain cement ranged from 2.07 to 2.09 g/cm^3. Both the composites, particularly EPS cement, have lower density than plain cement (Figure 2(a)). The decrease in bulk density of the composites was mainly due to the substitution of heavier material (cement) by lighter one (CF and EPS). Depending on replacement by EPS or CF, the bulk densities of the composites were decreased by 66% when specimen was dosed with 3 wt% EPS. The EPS cements have the bulk densities ranged between 0.71 to 1.43 g/cm^3. Whist a smaller decrease (~11%) in bulk density was

The International Conference on Materials Research and Innovation (ICMARI) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **773** (2020) 012055 doi:10.1088/1757-899X/773/1/012055

observed after adding 3 wt% CF at all the fiber lengths. The bulk densities of CF cements ranged between 1.85 to 1.95 g/cm3.

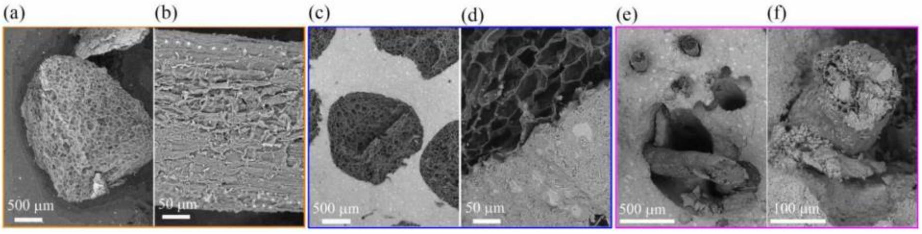


Figure 1. SEM images of (a) EPS, (b) CF and SEM images of the fractured surface of the composites (c-d) EPS cement and (e-f) CF cement.

The effect of EPS content on the flexural and impact strengths is shown in Figures 2(b) and (c). The flexural and impact strengths of EPS cement decreased as EPS content increased. Moreover, it can be seen that after EPS content exceeding 1 wt%, its effect on the impact strength of EPS cement become insignificant. The results showed that higher EPS content resulted in lower flexural strength, impact strength and density due to higher air-void content and looser structure in EPS composite with lower volume of cement. For the CF cements, the replacement of cement by CF notably improved flexural and impact strengths compared with plain cement (Figures 2(b) and (c)). The improvement rate increased with increasing cement replacement (flexural strength improved by 60-70% for all the CF lengths at 3% replacement). On replacing 3% cement by CF, at the CF lengths of 1, 2 and 3 cm, impact strength increased by 407, 668 and 860%, respectively. This may be because the better interaction between CF and cement and the fracture behavior of high strength composite contains crack bridging and some fiber pull-out (as shown in Figures 1(e)-(f)) that are responsible to resist crack propagation and improve the composite strength [6-8].

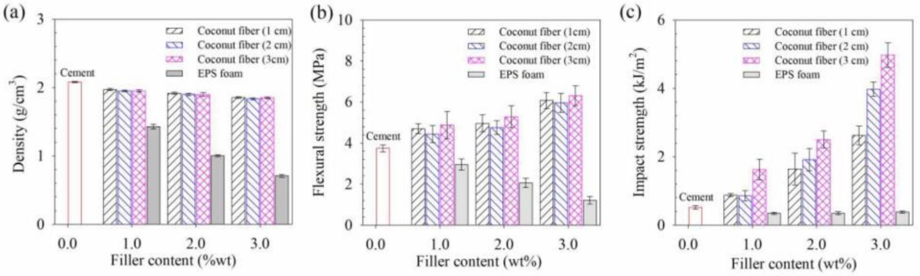


Figure 2. Effect of CF or EPS content at various CF lengths on (a) density, (b) flexural strength and (c) impact strength.

The combination of CF and EPS in cement replacement seems to improve their flexural and impact strengths and decrease the bulk density for structural lightweight cement board (Figures 3(a)-(c)). The increased flexural and impact strengths resulted from the addition of CF, whereas the existence of EPS is responsible for the reduction of bulk density. It seems that somewhat adverse effect of EPS beads in flexural and impact strengths could be compensated by adding CF to the EPS cement composite. Cement mixed with both CF and EPS showed improvements on increased flexural strength (24%), increased

The International Conference on Materials Research and Innovation (ICMARI) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **773** (2020) 012055 doi:10.1088/1757-899X/773/1/012055

impact strength (547%) and reduced density (41%) using 3% CF for 3 cm fiber length and 1% EPS). The CF/EPS/cement composite containing 3% CF at 3 cm fiber length and 1% EPS ($C_{33}E_1$) as well as 2% CF at 3 cm fiber length and 2% EPS ($C_{23}E_2$) showed acceptable flexural strength, impact strength and density for structural lightweight cement. According to $C_{33}E_1$, the structural lightweight cement has the average flexural strength of 4.62 MPa, impact strength of 3.35 kJ/m_2, bulk density of 1.23 g/cm_3, and consists entirely of lightweight cement.

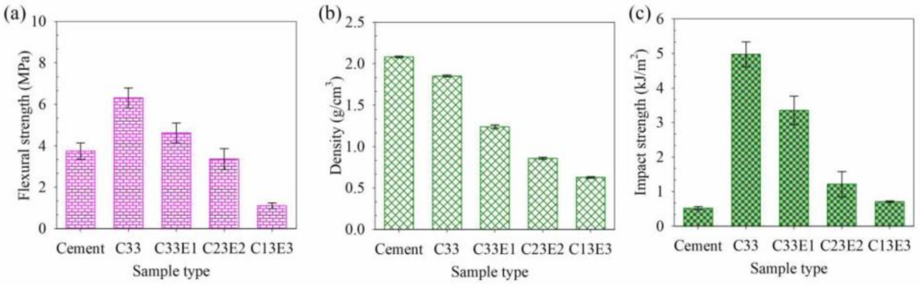


Figure 3. Effect of replacement level by the mixture of CF and EPS at 3 cm CF length on (a) flexural strength, (b) density and impact strength.

4. Conclusions

In this study, CF and EPS wastes can be used as a reinforcement and replacement of cement in the development of lightweight cement board. Application of CF improved the EPS /CF /cement composite properties including increased flexural and impact strengths and decreased bulk density. Adding EPS into cementitious mixtures significantly decreased the bulk densities of composites. Application of EPS also decreased the strength properties; however, the results showed the potential for producing different strength and lightweight cement composites; in particular satisfactory cement composite can be produced by replacing cement with 3% CF and 1% EPS as well as replacing with 2% CF and 2% EPS for the CF length of 3 cm. In this regard, to some adverse effect of EPS beads in strengths could be compensated by adding CF to the EPS cement composite. The findings of the present study supported acceptable performance in cement based composite materials for low-cost housing applications.

5. References

[1] Ingham JP 2013 Geomaterials Under the Microscope, *Academic Press,* 192 pages.
[2] Lertwattanaruk P and Suntijitto 2015 *Constr. Build. Mater.* **94** 664.
[3] Wang W and Chouw N 2018 *Constr. Build. Mater.***171** 546.
[4] Herki BA and Khatib JM 2017 *Eur. J. Environ. Civ. En.* **21** 1384.
[5] Dong X, Wang S, Gong C and Lu L 2014 *Constr. Build. Mater.* **773** 255.
[6] Pehanich JL, Blankenhorn PR and Silsbee MR 2004 *Cement Concrete Res.* **24** 59.
[7] Hwang CL, Tran VA, Hong JW and Hsieh YC 2016 *Constr. Build. Mater.***127** 984.
[8] Anggraini V, Asadi A, Syamsir A and Huat BBK 2017 *Measurement* **111** 158.

Acknowledgement
The authors would like to thank the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, and the Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chulalongkorn University.

รายการอ้างอิง

1. Phanprasit, W., et al., *Asbestos Exposure among Mitering Workers.* Safety and Health at Work, 2012. 3(3): p. 235-240.
2. World Health Organization, O. and T. Environmental Health, *Elimination of asbestos-related diseases*. 2006, World Health Organization: Geneva.
3. Ingham, J., *Geomaterials Under the Microscope*, ed. A. Press. 2013.
4. สำนักงานอุทยานการเรียนรู้. กะทิผลิตภัณฑ์มะพร้าวส่งออกหลักของไทย. 2561; Available from: http://www.tpso.moc.go.th/sites/default/files/news_20012011012152_29.pdf.
5. Suntijitto, L.P.a., *Constr. Build. Mater.* Vol. 94 2015.
6. Wang, W. and N. Chouw, *Experimental and theoretical studies of flax FRP strengthened coconut fibre reinforced concrete slabs under impact loadings.* Construction and Building Materials, 2018. 171: p. 546-557.
7. Brooks, A.L., H. Zhou, and D. Hanna, *Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites.* Construction and Building Materials, 2018. 159: p. 316-328.
8. คณะกรรมการบริหารโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์. 2009; Available from: https://danaicmp.wordpress.com/2009/07/08/.
9. Noey, N. ปูนซีเมนต์. 2559; Available from: http://nnbutter.blogspot.com/.
10. Raungrut. ปูนซีเมนต์. 2561; Available from: http://raungrut.tunjai.com/index.php?uid=1&pid=23&qid=1&menutyperboard.
11. Odler , I., Harilica ,J. , Brandstet ,J., . *Possibilities of utilizing solid residues from pressured fluidized bed coal combustion (PSBC) for the production of blended cements ,Cemical Concrete Res* Vol. 28 1998.
12. CPAC. ปูนซีเมนต์. 2000; Available from: https://cpacacademy.com/download/cpacacademycom/e-contech%20u2.pdf.
13. NEVILLE, *concrete technology*. Second ed. 2010. 8-38.
14. รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 4420. 2555; Available from: https://www.tisi.go.th/data/standard/fulltext/TIS-15-1-2555m.pdf.

15. บริษัทโฮมบายเออร์ไกด์. มาตรฐานซีเมนต์ 2553; Available from: https://www.home.co.th/hometips/decoration/detail/53441.

16. Dunstan, E. *How Does Pozzolanic Reaction Make Concrete Green ?* 2011.

17. CPAC. การบ่มคอนกรีต. 2002; Available from: http://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063.

18. ชาญวิทย์. โฟมพลาสติก. Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/238_74-78.pdf.

19. Polymaxx. *Expandable Polystyrene* Available from: http://www.irpcmarket.com/upload/infobox/ea35cec5692762643e0e4d5c7a12b3c5-doc.pdf.

20. Nofar, M. and C.B. Park, 1 - *Introduction to Plastic Foams and Their Foaming*, in *Polylactide Foams*, M. Nofar and C.B. Park, Editors. 2018, William Andrew Publishing. p. 1-16.

21. Pentrakoon, D. and J.W. Ellis, *An Introduction to Plastic Foams*. 2005, Bangkok: Chulalongkorn University Press. 1-52, 101-109, 135-178.

22. สุภิญญา. กล่องโฟมภัยใกล้ตัว. 2556; Available from: http://foodsan.anamai.moph.go.th/download/D_Nofoam/2558/1)Styrene.pdf.

23. MTEC. *Fibers*. 2004; Available from: https://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html.

24. รัตนคำนวณ. *FIBERS AND FABRIC SCIENCE*. 2557; Available from: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/u_ratanakamnuan/IC%20361%20วิทยาศาสตร์เส้นใยและผ้า1-57.pdf.

25. Yrprincess. ผลมะพร้าว. 2557; Available from: https://www.scimath.org/article-biology/item/4429-gg-nut.

26. กองบรรณาธิการพลังเกษตร. การปลูกมะพร้าวน้ำหอม. 2017; Available from: https://www.palangkaset.com/.

27. Shiju. *Coir fibre* 2013; Available from: https://www.alibaba.com/product-detail/Coir-fibre_158230177.html.

28. Dutton, J. *Biochemical structural aspects of lignocelulosic biomass*. 2013; Available from: https://www.e-education.psu.edu/egee439/node/664.

29. Verma, D. and P.C. Gope, 10 - *The use of coir/coconut fibers as reinforcements*

in composites, in *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, O. Faruk and M. Sain, Editors. 2015, Woodhead Publishing. p. 285-319.

30. โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. *Lignin*. Available from: http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20181016080740u.pdf.

31. โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ, เซลลูโลส (*Cellulose).*

32. Mathai, P.M., 7 - *Coir*, in *Bast and Other Plant Fibres*, R.E. Franck, Editor. 2005, Woodhead Publishing. p. 274-314.

33. Limited, V.I.C. ใยมะพร้าว. 2004; Available from: http://www.victoryindustrial.co.th/cprofile.html.

34. Monette, L., M.P. Anderson, and G.S. Grest, *The meaning of the critical length concept in composites: Study of matrix viscosity and strain rate on the average fiber fragmentation length in short-fiber polymer composites.* Polymer Composites, 1993. 14(2): p. 101-115.

35. NSW, U.S. *Fibre Reinforced Compposites*. 2013; Available from: www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/2-fibre-reinforced-compposites.

36. Asasutjarit, C., et al., *Development of coconut coir-based lightweight cement board*. Vol. 21. 2007. 277-288.

37. Hwang, C.-L., et al., *Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites.* Construction and Building Materials, 2016. 127: p. 984-992.

38. SUKANYA, H., *Potentials of Light-Weighted Concrete Slabs Produced from EPS Foam*. 2016, THAMMASAT UNIVERSITY

39. Abdullah, A., et al., *Composite Cement Reinforced Coconut Fiber: Physical and Mechanical Properties and Fracture Behavior.* Basic and Applied Sciences, 2011. 5(1991-8178): p. 1228-1240.

40. Kamarulzaman, N.A., et al., *Properties of Cement Brick Containing Expanded Polystyrene Beads (EPS) And Palm Oil Fuel Ash (POFA)*. Vol. 10. 2018.

41. คงสมศักดิ์ศิริ, *The Use of Plastic Foam as Aggregate in Facing Brick.* The Journal of Industrial Technology, 2005. 1(1).

42. Dixit, A., et al., *Lightweight structural cement composites with expanded*

polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. Cement and Concrete Composites, 2019. 102: p. 185-197.

43. Ramakrishna, G. and T. Sundararajan, *Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs*: *a comparative study.* Cement and Concrete Composites, 2005. 27(5): p. 547-553.

44. แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว. 2011; Available from: https://books.google.co.th/books?id=0jETjwEACAAJ.

45. Piyathammaphab, S., *CEMENT BOARD REINFORCED WITH BETEL NUT LEAF SHEETAND COCONUT FIBERS* 2011 Chulalongkorn University

46. Waters, C.L., et al., *Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017. 126: p. 380-389.

47. Prasad, N., V. Agarwal, and S. Sinha, *Thermal degradation of coir fiber reinforced low-density polyethylene composites.* Science and Engineering of Composite Materials, 2016. 25.

48. Hidalgo, M., et al., *Recycled Polypropylene-Coffee Husk and Coir Coconut Biocomposites: Morphological, Mechanical, Thermal and Environmental Studies*. 2018.

49. Suresh, R., et al., *Esterification of free fatty acids in non- edible oils using partially sulfonated polystyrene for biodiesel feedstock.* Industrial Crops and Products, 2017. 95: p. 66-74.

50. Asasutjarit, C., et al., *Development of coconut coir-based lightweight cement board.* Construction and Building Materials, 2007. 21(2): p. 277-288.

51. Asasutjarit, C., et al., *Materials and mechanical properties of pretreated coir-based green composites.* Composites Part B: Engineering, 2009. 40(7): p. 633-637.

52. Savastano, H., P.G. Warden, and R.S.P. Coutts, *Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites.* Cement and Concrete Composites, 2000. 22(5): p. 379-384.

53. Ramakrishna, G. and S. Thirumalai, *Impact strength of a few natural fibre*

reinforced cement mortar slabs: A comparative study. Cement and Concrete Composites, 2005. 27: p. 547-553.

54. Munawar, S.S., K. Umemura, and S. Kawai, *Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles.* Journal of wood science., 2007. 53(2): p. 108-113.

55. Barsoum, M.W., *Fundamentals of ceramics*. Materials Science and Engineering, ed. D.o.M. B Cantor, University of Oxford, UK, S.o.M.a.M. M J Goringe, and U.o.S. Engineering, UK. 2003.

56. Hwang, C.-L., et al., *Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites.* Construction and Building Materials, 2016. 127.

57. Anggraini, V., et al., *Three point bending flexural strength of cement treated tropical marine soil reinforced by lime treated natural fiber.* Measurement, 2017. 111: p. 158-166.

58. Lumingkewas, R., et al., *Effect of Fibers Content on the Tensile Properties of Coir Fibers Reinforced Cement Mortar Composites.* Advanced Materials Research, 2013. 742: p. 92-97.

59. Aggarwal, L.K., *Bagasse-reinforced cement composites.* Cement and Concrete Composites, 1995. 17(2): p. 107-112.

60. Lertwattanaruk, P. and A. Suntijitto, *Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications.* Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 664-669.

61. Abdullah, A., *Composite Cement Reinforced Coconut Fiber: Physical and Mechanical Properties and Fracture Behavior.* Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011. 5: p. 1228-1240.

62. Alvarez, V., R. Ruseckaite, and A. Vázquez, *Mechanical Properties and Water Absorption Behavior of Composites Made from a Biodegradable Matrix and Alkaline-Treated Sisal Fibers.* Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER, 2003. 37: p. 1575-1588.

63. Faruk, O., et al., *Biocomposites reinforced with natural fibers:* 2000–2010. Progress in Polymer Science, 2012. 37(11): p. 1552-1596.

64. Mounanga, P., et al., *Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes.* Cement and Concrete Composites, 2008. 30(9): p. 806-814.

65. Othuman Mydin, M.A. and Y. Wang, *Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures.* Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER, 2012. 26.

66. Othuman Mydin, M.A. and S. Soleimanzadeh, *Influence of High Temperatures on Flexural Strength of Foamed Concrete Containing Fly Ash and Polypropylene Fiber.* International Journal of Engineering, 2013. 26(2): p. 117-126.

67. Laukaitis, A., R. Žurauskas, and J. Kerienė, *The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties.* Cement and Concrete Composites, 2005. 27(1): p. 41-47.

68. Petrella, A., R. Di Mundo, and M. Notarnicola, *Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates.* Materials, 2020. 13(4).

69. K, R., E. Nambiar, and G. Ranjani, *A classification of studies on properties of foam concrete.* Cement and Concrete Composites, 2009. 31: p. 388-396.

70. Nambiar, E. and R. K, *Air-void characterisation of foam concrete.* Cement and Concrete Research, 2007. 37: p. 221-230.

71. Wee, T.-H., et al., *Air-void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties*. 2006.

72. Chen, B. and J. Liu, *Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber.* Cement and Concrete Research, 2004. 34(7): p. 1259-1263.

73. Nambiar, E.K.K. and K. Ramamurthy, *Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology.* Cement and Concrete Composites, 2006. 28(9): p. 752-760.

74. Dong, X., et al., *Effects of aggregate gradation and polymer modifiers on properties of cement-EPS/vitrified microsphere mortar.* Construction and

Building Materials, 2014. 73: p. 255-260.

75. ganesh babu, k. and D.S. Babu, *Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume.* Cement and Concrete Research, 2003. 33: p. 755-762.

76. Wanchok, *Mechanical Properties, Microstructure, Thermal Conductivity and Drying Shrinkage of Cellular Lightweight Concrete Containing Bagasse Ash.* The Journal of Industrial Technology, 2017. 13(2): p. 22-38.

77. Baspinar, M.S. and E. Kahraman, *Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules.* Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER, 2011. 25: p. 3327-3333.

78. Shams, A., M. Horstmann, and J. Hegger, *Experimental investigations on Textile-Reinforced Concrete (TRC) sandwich sections.* Composite Structures, 2014. 118: p. 643-653.

79. Chen, B. and N. Liu, *A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties.* Construction and Building Materials, 2013. 44: p. 691-698.

80. Brose, A., J. Kongoletos, and L. Glicksman, *Coconut Fiber Cement Panels as Wall Insulation and Structural Diaphragm.* Frontiers in Energy Research, 2019. 7(9).

81. Kochova, K., et al., *Using alternative waste coir fibres as a reinforcement in cement-fibre composites.* Construction and Building Materials, 2020. 231: p. 117121.

82. Lin, X., M.R. Silsbee, and D.M. Roy, *The Microstructure of Wood Fiber Reinforced Cementitious Composites.* MRS Proceedings, 2011. 370.

83. Chakraborty, S., et al., *Improvement of the mechanical properties of jute fibre reinforced cement mortar: A statistical approach.* Construction and Building Materials, 2013. 38: p. 776-784.

84. Coutts, R.S.P. and P.G. Warden, *Air-cured abaca reinforced cement composites.* International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1987. 9(2): p. 69-73.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

85. Petrella, A., R. Di Mundo, and M. Notarnicola, *Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates.* Materials, 2020. 13: p. 988.

86. Gutiérrez-González, S., et al., *Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes.* Construction and Building Materials, 2012. 28(1): p. 653-658.

87. Jr, H., P.G. Warden, and R. Coutts, *Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites.* Cement and Concrete Composites, 2005. 27: p. 583-592.

88. Sathiparan, N., M.N. Rupasinghe, and B. H.M. Pavithra, *Performance of coconut coir reinforced hydraulic cement mortar for surface plastering application.* Construction and Building Materials, 2017. 142: p. 23-30.

89. Santos, F.M.R.d., et al., *Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste.* Construction and Building Materials, 2016. 128: p. 315-323.

90. Company, S.p. *Technical data Shera board*. 2020; Available from: https://www.shera.com/th/digital-catalog.

91. viva. *technical viva board*. 2020; Available from: https://www.viva.co.th/viva-th.

92. Gyproc. แผ่นยิปซัม ยิปรอค. 2020; Available from: https://www.gyproc.co.th/th/.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนินทร ภูศรี
วัน เดือน ปี เกิด	5 พฤศจิกายน 2538
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบันฑิต (วศ.บ.) ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	271 ถ.25 มกรา ต.บ่อพลับ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000
ผลงานตีพิมพ์	Chanintorn Pusri, Bussarin Ksapabutr, Nattawut Chaiyut, and Manop Panapoy, Performance of lightweight cement board using coconut coir fiber and expanded polystyrene foam waste, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 773 (2020) 012055, doi:10.1088/1757-899X/773/1/012055.

มหาวิทยาลัยศิลปากร