รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้ประโยชน์จากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการผลิตอิฐบล็อกประสาน

Utilization of High Volume Ground Palm Oil Fuel Ash for using as Pozzolanic Material in the Interlocking Block Product

ทวิช กล้าแท้ Tawich Klathae

นภดล ศรภักดี Napadon Sornpakdee

ชูเกียรติ ชูสกุล Chookiat Choosakul

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2566

การใช้ประโยชน์จากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการผลิตอิฐบล็อกประสาน

ทวิช กล้าแท้[1] นภดล ศรภักดี[1] และ ชูเกียรติ ชูสกุล[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูงในการผลิตอิฐบล็อกประสาน โดยการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ที่ร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยอัตราส่วนวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน) ต่อดินลูกรังในอัตราส่วน 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานรับแรงอัด ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน รวมถึงทดสอบการดูดกลืนน้ำและความหนาแน่นแห้งที่อายุ 28 วัน กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อิฐบล็อกประสาน (มผช. 602/2547) จากผลการทดสอบพบว่าค่ารับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด อัตราการแทนที่ร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วน 1:6 และอัตราการแทนที่ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน (602/2547) ชนิดไม่รับน้ำหนัก สำหรับการประเมินต้นทุนการผลิต พบว่าอิฐบล็อกประสานที่แทนที่ OPC ด้วย GPOFA มีต้นทุนวัสดุลดลงร้อยละ 24 ถึง 48 ในขณะที่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าอิฐบล็อกประสานที่มีการใช้ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 44 ถึง 61 เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกประสานที่มี OPC เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ : เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด, ปริมาณสูง, วัสดุปอซโซลาน, อิฐบล็อกประสาน, อิฐบล็อกประสานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

---

[1]อาจารย์ หลักสูตรวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช

Utilization of High Volume Ground Palm Oil Fuel Ash for using as Pozzolanic Material in the Interlocking Block Product

Tawich Klathae[1] Napadon Sornpakdee [1] and Chookiat Choosakul[1]

Abstract

This research aimed to investigate the utilization of high volume palm oil fuel ash (GPOFA) in interlocking block products. For the interlocking block production, GPOFA was partly used to replace ordinary Portland cement (OPC). The ratios of materials were binder (OPC and GPOFA) to lateritic soil were 1:6 and 1:8, used in cement replacement at 0, 50, 60 and 70 %wt of binder, in order to compare the compressive strength in the curing period at the ages of 7, 28, 60 and 90 days. Moreover, water absorption test, density at the age of 28 days, according to interlocking block standards of TCPS. 602/2547. The results show that the compressive strength of the interlocking blocks replacement rates at 50, 60 and 70 %wt of binder, in a ratio of 1:6, and replacement rates at 50 and 60 %wt of binder, in a ratio of 1:8, in the curing period at the age of 28 days met the criteria of the interlocking block standards of TCPS. 602/2547 as non-load-bearing type. In terms of the production cost, GPOFA interlocking blocks resulted in a reduction the material cost by 2 4 –4 8 %. However, environmental issues of GPOFA interlocking blocks showed a decrease in carbon dioxide emission of 4 4 –6 1 % as compared to CT mixture.

keywords: Eco-Friendly interlocking block, Ground palm oil fuel ash, High volume, Interlocking block, Pozzolanic material.

---

[1]Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Khanom, Nakhonsithammarat

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2566 เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูงในการผลิตอิฐบล็อกประสาน

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยนี้ ขอบคุณหลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการในการทดลองวิจัย ขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้การช่วยเหลืออำนวยความสะดวกด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัยที่อุทิศกำลังกายและกำลังใจช่วยในการวิจัยครั้งนี้ลุล่วงได้ด้วยดี ตลอดจนครอบครัวที่ให้ความห่วงใยเป็นกำลังใจให้เสมอมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านและหน่วยงาน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาส นี้

ทวิช กล้าแท้
นภดล ศรภักดี
ชูเกียรติ ชูสกุล
กรกฎาคม 2566

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญตาราง..... ฉ
สารบัญภาพ..... ซ
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์..... 3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่สำคัญ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 ปูนซีเมนต์และองค์ประกอบทางเคมี..... 5
2.2 วัสดุปอซโซลาน..... 7
2.3 เถ้าปาล์มน้ำมัน..... 7
2.4 อิฐบล็อกประสาน..... 10
2.5 วัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับทำอิฐบล็อกประสาน..... 13
2.6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสาน..... 17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 22

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย 26

3.3 การผลิตอิฐบล็อกประสานตัวอย่าง 28

3.4 การขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานและการบ่ม 29

3.5 การทดสอบอิฐบล็อกประสาน 30

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน 32

4.2 ผลการทดสอบของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง 37

4.3 ผลการทดสอบของอิฐบล็อกประสาน 40

4.4 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกประสาน 49

4.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอิฐบล็อกประสาน 52

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย 53

บรรณานุกรม 55

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสานและวัสดุผสม 61

ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของอิฐบล็อกประสาน 68

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่จากโครงการวิจัย 86

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2-1 สมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน 8
2-2 คุณลักษณะทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน 9
2-3 คุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าปาล์มน้ำมัน 10
2-4 คุณสมบัติของเสียที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ 15
2-5 การประเมินความเหมาะสมในการนำของเสียมาผลิตอิฐบล็อกประสาน 17
2-6 คุณลักษณะอิฐบล็อกประสานที่ต้องการ 18
2-7 การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน 18
3-1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ 26
3-2 Mixture proportions (Binder: Lateritic soil, 1:6) 27
3-3 Mixture proportions (Binder: Lateritic soil, 1:8) 27
3-4 Number of Interlocking block 1:6, และ 1:8 (Cement: lateritic soil) 28
4.1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) และ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) 35
4-2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรัง 37
4-3 สมบัติจำเพาะของมวลรวมละเอียด 37
4-4 กำลังอัดของมอร์ตาร์. 40
4-5 The economical of interlocking blocks 1:6. 50
4-6 The economical of interlocking blocks 1:8. 50
4-7 Break-even point of interlocking blocks 1:6 51
4-8 Break-even point of interlocking blocks 1:8 51
ก-1 ผลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินลูกรัง 62
ก-2 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ขนาดคละของดินลูกรัง 62
ก-3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) 63
ก-4 ผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังอัตราส่วน 1:6 64
ก-5 ผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังอัตราส่วน 1:8 64
ก-6 ผลการทดสอบการหาพิกัดพลาสติก (Plastic Limits) 66
ก-7 ผลการทดสอบการหาพิกัดพลาสติก (Plastic Limits) 66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 0 (CT) 69
ข-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 20 (20GPOFA) 70
ข-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 50 (50GPOFA) 71
ข-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 60 (60GPOFA) 72
ข-5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 70 (70GPOFA) 73
ข-6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 7 วัน 74
ข-7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 75
ข-8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 60 วัน 76
ข-9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 90 วัน 77
ข-10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 7 วัน 78
ข-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 79
ข-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 60 วัน 80
ข-13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 90 วัน 81
ข-14 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุ 28 วัน 82
ข-15 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุ 28 วัน 83
ข-16 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 84
ข-17 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 85

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2-1 อิฐบล็อกประสานขนาด 12.5 x 25 x 10 เซนติเมตร 11
2-2 ตัวอย่างอาคารอิฐบล็อกประสาน 11
2-3 อิฐบล็อกประสานโค้งขนาด 15 x 30 x 10 เซนติเมตร 11
2-4 ถังน้ำอิฐบล็อกประสาน 12
2-5 เครื่องอัดอิฐประสานด้วยแรงคน 14
2-6 เครื่องอัดอิฐประสานแบบอุตสาหกรรมขนาดย่อม 14
3-1 เถ้าปาล์มน้ำมัน (OPOFA) จากโรงงานในจังหวัดสุราษฎร์ธานี 22
3-2 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA) 22
3-3 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) 22
3-4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 23
3-5 ทรายแม่น้ำ 23
3-6 ดินลูกรัง 24
3-7 อุปกรณ์หาค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ 24
3-8 แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. 24
3-9 อุปกรณ์ชุดทดลองหาความถ่วงจำเพาะ 24
3-10 อุปกรณ์หาค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ 24
3-11 อุปกรณ์ชุดทดลองหาขีดการไหลตัวและขีดความอ่อนตัว 25
3-12 อุปกรณ์ชุดทดลองการบดอัด 25
3-13 อุปกรณ์ชุดทดลองหาขนาดโดยใช้ตะแกรง 25
3-14 เครื่องผสมดินลูกรัง 25
3-15 เครื่องทดสอบกำลังอัด 25
3-16 เครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบไฮดรอลิก 25
3-17 ก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน 27
3-18 การผสมอิฐบล็อกประสาน 29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-19 การอัดอิฐบล็อกประสานด้วยระบบไฮดรอลิค 29
3-20 การผึ่งอิฐบล็อกประสานในที่ร่ม 29
3-21 การบ่มอิฐบล็อกประสาน 29
3-22 ลักษณะทั่วไปของอิฐบล็อกประสาน 31
3-23 การตกแต่งอิฐบล็อกประสาน 31
3-24 การเคลือบผิวด้วยปูนพลาสเตอร์ 31
3-25 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด 31
4-1 ภาพถ่ายขยายอนุภาค 33
4-2 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) 34
4-3 ผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) ของวัสดุประสาน 38
4-4 ผลของร้อยละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและการไหลแผ่ 38
4-5 ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 41
4-6 การดูดกลืนน้ำเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 42
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 43
4-8 กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 44
4-9 กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8 45
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 48
4-12 ราคาวัสดุของของการผลิตอิฐบล็อกประสาน 50
4-13 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของ 1 ม^3 52
ก-1 ผลการทดสอบการหาขนาดของเม็ดดินลูกรัง 63
ก-2 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นของดินลูกรังอัตราส่วน 1:6 65
ก-3 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นของดินลูกรังอัตราส่วน 1:8 65
ก-4 ผลการทดสอบการหาพิกัดข้นเหลว 67

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ในสภาพปัจจุบันการก่อสร้างในระบบเสาและคานที่มีผนังก่อด้วยอิฐมอญเป็นระบบการก่อสร้างที่ใช้ระยะเวลานาน และต้องการช่างที่มีฝีมือในการก่ออิฐและฉาบปูนเรียบ รวมทั้งขบวนการผลิตอิฐมอญต้องใช้พลังงานและเชื้อเพลิงในการเผาเพื่อให้อิฐมีความแกร่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำลายสภาพแวดล้อมธรรมชาติและสร้างมลพิษทางอากาศ ปัจจัยดังกล่าวนับเป็นโอกาสอันดีของธุรกิจบล็อกประสาน เพราะบล็อกประสานเกิดจากกระบวนการผลิตที่ไม่ก่อให้เกิดการทำลายสภาวะแวดล้อมและใช้วัตถุดิบภายในประเทศทั้งหมด และระบบการก่อสร้างด้วยบล็อกประสานเป็นระบบการกอ่สร้างแบบผนังรับน้ำหนัก (Load Bearing Wall) ทำให้การก่อสร้างเป็นไปด้วยความรวดเร็วเป็นไปตามแผนที่กำหนดไว้ ไม่ต้องใช้แรงงานที่มีฝีมือมากนักในการก่อบล็อกประสาน ทำให้มีมาตรฐานการก่อสร้างที่สูง นอกจากนี้ระบบการก่อสร้างผนังรับแรงด้วยบล็อกประสานมีต้นทุนของบ้านทั้งหลังต่ำกว่าระบบเสาและคานที่ใช้อิฐมอญเป็นผนังจึงทำให้เชื่อได้ว่าธุรกิจบล็อกประสานจะประสบความสำเร็จในการแข่งขันกับอิฐมอญ (แผนธุรกิจอิฐบล็อกประสาน, 2550; สำเร็จ, 2556) บล็อกประสาน (Interlocking Block) เป็นวัสดุประเภทหนึ่งในงานก่อสร้าง ซึ่งเน้นการใช้วัตถุดิบในพื้นที่เป็นมวลรวม เช่น ดินลูกรัง หินฝุ่น ทรายหรือวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสม โดยผสมกับปูนซีเมนต์ และน้ำโดยสัดส่วนที่เหมาะสม นำมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแห้ง บ่มด้วยความชื้นไม่น้อยกว่า 7 วัน จะได้บล็อกประสานที่มีความแข็งแรงและใช้ในงานก่อสร้างอาคารในระบบผนังรับน้ำหนักได้อย่างรวดเร็วและสวยงาม (ธนธร, 2554) ด้วยขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนการผลิตบล็อกประสานจึงแปรผันตามแหล่งดินและปูนซีเมนต์ แหล่งดินเป็นต้นทุนคงที่สำหรับพื้นที่การผลิตหนึ่ง ดังนั้น ตัวแปรต้นทุนที่สามารถปรับเปลี่ยนได้จึงเป็นเพียงปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์ต้องมีการระเบิดหินปูนเพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต การสูญเสียทรัพยากรทางธรรมชาติเหล่านี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณการบริโภคปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นในปัจจุบัน ยิ่งไปกว่านั้นจากงานวิจัยของ Habert, Billard, Rossi, Chen, and Roussel (2010) ทำให้ทราบว่าการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ลอยไปสู่ชั้นบรรยากาศ 1 ตัน ด้วยเหตุนี้หากสามารถมีการลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้ ไม่เพียงแต่เป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติแต่ยังสามารถทำให้อิฐบล็อก

ประสานเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Chindaprasirt, Homwuttiwong, and Jaturapitakkul, 2007; Homwuttiwong, Jaturapitakkul, and Chindaprasirt, 2012; Sinsiri Kroehong, Jaturapitakkul, and Chindaprasirt, 2012) ฝ่ายนวัตกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้วิจัยและพัฒนาบล็อกประสานเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อรับน้ำหนัก (Bearing masonry units) บล็อกประสานเป็นวัสดุที่มีรูและเดือยบนตัวบล็อก เมื่อก่อเรียงบล็อกประสานจนได้ระดับที่ต้องการแล้ว ช่างก่อสร้างจะเสริมเหล็กเสริมในรูบนตัวบล็อกและเทคอนกรีตเข้าในรูและเดือยเพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างผนัง ขั้นตอนการผลิตบล็อกประเภทนี้ไม่ซับซ้อนและสามารถทำเป็นธุรกิจขนาดย่อมและขนาดกลางได้ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตบล็อกประกอบด้วยดินและปูนซีเมนต์ เมื่อผสมดินเข้ากับปูนซีเมนต์และน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะก็จะทำการอัดขึ้นรูปในเครื่องอัด (Cinva Ram) เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด (ไม่น้อยกว่า 7 วัน) ผู้ผลิตก็สามารถจำหน่ายบล็อกประสานได้ ดินที่เหมาะสมในการทำบล็อกประสาน ส่วนใหญ่จะเป็นดินลูกรัง ดินลูกรัง หินฝุ่น ทราย หรือวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ที่มีขนาดเม็ดดินไม่เกิน 4 มิลลิเมตร (สำเร็จ, 2556)

ปาล์มน้ำมันคือ พืชเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่งที่มีสินค้าทางการเกษตรสำคัญเป็นอันดับ 5 ประเทศไทย รองจาก ข้าว, ยางพารา, อ้อย และมันสำปะหลัง หรือมีความสำคัญเป็นอันดับ 2 ของภาคใต้รองจาก ยางพารา จากรายงาน พบว่าในปี 2562 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 5.6 ล้านไร่ และให้ผลผลิตสูงถึง 16.4 ล้านตัน (วิจัยกรุงศรี, 2563) ปาล์มน้ำมันเหล่านี้ถูกส่งเข้าโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์ม ด้วยเหตุนี้ทำให้มีกากของผลปาล์มน้ำมันอันได้แก่ กากเส้นใยปาล์ม ทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม และเศษกะลาปาล์มเกิดขึ้นสูงขึ้นตามปริมาณผลผลิต ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 53 ของผลปาล์มน้ำมัน (Tangchirapat, Tangpakasit, Waew-kum, and Jaturapitakkul, 2003) หรือเกิดกากของผลปาล์มน้ำมันประมาณ 8.5 ล้านตัน/ปี กากของผลปาล์มน้ำมันจะถูกส่งเข้าเตาเผาเป็นเชื้อเพลิงกับหม้อไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าไว้ใช้ในโรงงาน ทำให้โรงงานน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่มีเถ้าปาล์มน้ำมันถูกกองทิ้ง เถ้าปาล์มน้ำมันจะเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 5 ของกากผลปาล์มน้ำมัน ที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา (Tangchirapat, Saeting, Jaturapitakkul, Kiattikomol, and Siripanichgorn, 2007) นั่นหมายความว่าในปี 2563 มีเถ้าปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นประมาณ 0.425 ล้านตัน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณผลผลิตของปาล์มน้ำมันที่สูงขึ้นในแต่ละปี (ชัย และวีรชาติ, 2556)

จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี และมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น แต่งานวิจัยก่อนหน้านี้มีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในอัตราไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมัน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง ในอัตราร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง และยังเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้งอีกทั้งยังเป็นการช่วยจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง
2. เพื่อศึกษากระบวนการผลิต อัตราส่วนที่เหมาะสม และความคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์ต้นแบบอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง
3. เพื่อลดต้นทุนการผลิตอิฐบล็อกประสาน และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตปาล์มน้ำมัน
4. เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยี และขั้นตอนการผลิตให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมก่อสร้างวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม รวมถึงชุมชนผ่านการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้

1) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, (American Society for Testing and Materials, 2018a)

2) เถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) ที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จากโรงงานในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

3) บล็อกประสานตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีขนาด 12.5x25x10 เซนติเมตร

4) ตัวอย่างทดสอบเป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ดินลูกรัง และน้ำ โดยอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด) ต่อดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใช้กันโดยทั่วไปในการผลิตบล็อกประสาน

5) อัตราส่วนอิฐบล็อกประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content; OMC)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้ใหม่ในด้านการศึกษาถึงสมบัติของของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ในการนำมาใช้ในงานบล็อกประสาน

2. กรอบการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงไปใช้งานตามหลักวิศวกรรมในงานบล็อกประสาน

3. เป็นแนวทางในการสร้างวัสดุทดแทนเพื่อการนำไปใช้งานที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับวัสดุเดิม และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มแก่วัตถุดิบที่มีมูลค่าต่ำและมีอยู่ในปริมาณสำรองจำนวนมากในปัจจุบัน

4. ได้แนวทางสร้างงานและอาชีพและลดต้นทุนการผลิตวัสดุผสมลง

5. ส่งเสริมการประหยัดพลังงานในรูปแบบการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งจะส่งผลให้ลดพลังงานในการเผาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง

6. เป็นแนวทางการใช้วัสดุทดแทนเพื่อการอนุรักษ์สภาพแวดล้อม และธรรมชาติ ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่บรรยากาศให้น้อยลง

7. เป็นการสร้างจิตสำนึกในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุด

บทที่ 2
ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์และองค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตมาจากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ จนรวมตัวกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ประกอบด้วย 1. วัสดุที่มีธาตุแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลักเช่น หินปูนหรือชอล์กและ 2. วัสดุที่มีธาตุอลูมินัมและซิลิก้าเป็นองค์ประกอบ เช่นหิน (Shale) หรือดินเหนียว (Clay) และ 3. พวกที่ให้ธาตุเหล็กคือ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือดินลูกรัง (Laterite) ขั้นตอนในการผลิตซีเมนต์แบ่งเป็น การผลิตแบบเปียก (Wet Process) และ การผลิตแบบแห้ง (Dry Process) การผลิตแบบเปียกนั้นเป็นกรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นสูงมาบดผสมกันในสภาพที่เปียกและเติมน้ำเพิ่มลงไปในอัตราส่วนที่พอเหมาะเพื่อช่วยในการบดผสม วัตถุดิบที่เตรียมเสร็จจะมีน้ำเป็นส่วนผสมประมาณ 35-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในรูป Slurry กรรมวิธีในการเผาจะใช้พลังงานความร้อนมากกว่าการผลิตแบบแห้งเพราะว่าต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งในการไล่ความชื้นใน Slurry ออกให้หมดก่อนที่จะเผาต่อเพื่อให้ได้ปูนเม็ดออกมา กรรมวิธีในการผลิตแบบเปียกนี้ถือได้ว่าเป็นวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในสมัยก่อน ซึ่งในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากต้องใช้พลังงานมากในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตแบบแห้ง คือการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นปกติ เช่น หินปูน (Limestone), หินดินดาน(Shale), ดินลูกรัง (Laterite) และแร่เหล็ก (Iron Ore) มาบดผสมในสภาพที่แห้งและนำไปเข้าเตาเผาโดยเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ 1450 °C หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงก็จะได้เป็นปูนเม็ด (Clinker) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดประมาณ 3-25 มม. หลังจากที่ได้เป็นปูนเม็ดแล้วก็จะนำปูนเม็ดไปบดในหม้อบดปูนซีเมนต์ (Cement Mill) โดยทำการบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซัมบดจนได้ความละเอียดตามที่ต้องการ หลังจากนั้นก็นำปูนซีเมนต์ที่ได้ไปบรรจุเพื่อจัดจำหน่ายต่อไป

2.1.1 องค์ประกอบต่างๆของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปจะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ

ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO (60-67 เปอร์เซ็นต์), SiO_2 (17-25 เปอร์เซ็นต์), Al_2O_3 (3-8 เปอร์เซ็นต์)และ Fe_2O_3 (0.5-0.6 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งรวมกันประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, TiO_2, Mn_2O_3, Na_2O, K_2O

1. สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของออกไซด์หลักในขบวนการเผาปูนเม็ด ซึ่งจะทำให้ได้สารประกอบหลัก 4 ชนิด คือ

ไตรคัลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$ หรือ ตัวย่อ C_3S) เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยาจะให้ความร้อนประมาณ 500 จูลต่อกรัม มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นมากในช่วงสัปดาห์แรก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3S ประมาณ 50-70เปอร์เซ็นต์

ไดคัลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$ หรือ ตัวย่อ C_2S) มีการแข็งตัวและให้กำลังช้ากว่า C_3S เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและให้ความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม ซึ่งค่าความร้อนจากปฏิกิริยาที่มีค่าน้อยทำให้ปูนซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบของ C_2S มากช่วยลดการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิลงได้ ส่วนกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในระยะหลัง ซึ่งในระยะยาวแล้วกำลังที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับ C_3S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_2S ประมาณ 15-30 เปอร์เซ็นต์

ไตรคัลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$ หรือ ตัวย่อ C_3A) เป็นสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ให้ค่าความร้อนประมาณ 850 จูลต่อกรัม ซึ่งในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ทำการป้องกันการเกิด Flash Set โดยการเติมยิปซั่มเพื่อหน่วงการก่อตัวอันเนื่องจากปฏิกิริยาของ C_3A และจำพัฒนากำลังอัดในช่วง 1-2 วันแต่มีค่ากำลังอัดที่ต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้าต้องการปูนซีเมนต์ที่สามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดี ก็ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีค่า C_3A ต่ำ

เตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์ ($4CaO.\ Al_2O_3.\ Fe_2O_3$ หรือ ตัวย่อ C_4AF) เป็นสารประกอบที่ได้จากวัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียมเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม มีผลทำให้ปูนซีเมนต์เป็นสีเทา ซึ่งสำหรับปูนซีเมนต์ขาวจะมีสัดส่วนของ C_4AF อยู่ในปริมาณที่น้อยมากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF ประมาณ 5-15

2. สารประกอบรองของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้ผลกระทบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

ยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) เป็นสารประกอบที่ใส่เข้าไปในขั้นตอนการบดปูนเม็ด เพื่อไปทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็น Ettringite และ Monosulphate เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A ส่วนมากจะเติมยิปซัมประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์

Free Lime (CaO) ซึ่งอาจจะเกิดจากวัตถุดิบที่มีปริมาณ CaO มากเกินไป หรือเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ เช่นการเผาปูนยังไม่สุกได้ที่ ซึ่งตัว Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้วทำให้เกิดการขยายปริมาตรอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้เนื่องจากการไม่อยู่ตัวของปูนซีเมนต์ (Unsoundness)

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์โดยปกติจะมี $MgCO_3$ เมื่อเผาแล้วจะได้ MgO และ CO_2 ซึ่งเมื่อ MgO ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะคล้ายกับ CaO คือจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น แต่ส่วนมากจะให้ผลที่ค่อนข้างรุนแรงกว่า โดยปกติจะควบคุมปริมาณ MgO ให้มีปริมาณไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้ามีมากกว่านี้ก็จะมีความเสี่ยงต่อการเกิดความไม่อยู่ตัวของปูนซีเมนต์ (Unsoundness)

อัลคาไลออกไซด์ (Na_2O, K_2O) ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือด่างในปูนซีเมนต์ มาผสมเป็นคอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction หรือ AAR เป็นผลทำให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย

2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ระบุตามมาตราฐาน ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2017) นิยามว่า วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักที่ประกอบไปด้วย ซิลิกาออกไซด์ (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) และ วัสดุปอซโซลานไม่มีคุณสมบัติในด้านการยึดประสานหรือมีค่าต่ำมาก แต่เมื่อนำวัสดุ ปอซโซลานผ่านการพัฒนาให้มีความละเอียดจนมีขนาดอนุภาคสูงขึ้นและมีความชื้นเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจะสามารถทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิปกติได้จากปฏิกิริยาข้างต้นส่งผลให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติในด้านการยึดประสานที่คล้ายกับการใช้ปูนซีเมนต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตทั่วไปตัวอย่างเช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซิลิกาฟูม เถ้าปาล์มน้ำมัน และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นต้น

2.2.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O$, C-S-H) โดยอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่มีค่าความเป็นด่างสูง เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นสารประกอบหลักในวัสดุปอซโซลานจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 (ชัย และ วีรชาติ, 2556)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow aCaO{\cdot}bSiO_2{\cdot}cH_2O \qquad (2.1)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO{\cdot}yAl_2O_3{\cdot}ZH_2O \qquad (2.2)$$

ค่า x, y และ z เป็นตัวแปรที่แปรผันตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H)

2.3 เถ้าปาล์มน้ำมัน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับเถ้าแกลบและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือ ประมาณร้อยละ 60-70 มีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 70 มีปริมาณ SO_3

ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าสูงในระดับปานกลาง ซึ่งปริมาณ LOI ที่สูงระดับนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่สั้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials, 2017) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ แม้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจะถือได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (เพราะได้จากการเผากากของผลปาล์มน้ำมัน) ซึ่งแตกต่างจาก ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2017) ที่ระบุว่าวัสดุปอซโซลาน Class N เป็นวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ

2.3.1 สมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งสรุปไว้โดย Safiuddin M and others องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยมีค่าประมาณร้อยละ 40.0-66.0 สำหรับปริมาณของอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่าประมาณร้อยละ 1.5-14.3 และ 1.4-8.4 ตามลำดับ ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอริกออกไซด์มีค่าระหว่างร้อยละ 55-70 ค่าซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_3) ของเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5 ประเภท C สำหรับค่า LOI มีค่าตั้งแต่ร้อย 0.1 ถึง 21.5 ซึ่งปอซโซลานจากเถ้าถ่านหินกำหนดค่า LOI ไม่เกินร้อยละ 6 และร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่าค่า LOI มีทั้งค่าต่ำกว่าร้อยละ 6 ซึ่งเป็นเกณฑ์กำหนดของวัสดุปอซโซลานประเภท C และ F อีกทั้งมีค่าเกินกว่าร้อยละ 10 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์กำหนดของวัสดุปอซโซลานประเภท N จากผลองค์ประกอบเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่กล่าวมานี้สามารถสรุปได้องค์ประกอบหลักนั้นคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) การจำแนกค่าองค์ประกอบเคมีเทียบกับ ASTM C618 ไม่สามารถกำหนดแน่ชัดได้ว่าเถ้าปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกับวัสดุปอซโซลานประเภท ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบเคมีจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบหรือกากปาล์มที่ป้อนเข้าเตาเผาและอุณหภูมิในการเผา (Safiuddin, Abdus Salam, and Jumaat, 2011; Foo K and Hameed, 2009)

ตารางที่ 2-1 สมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่มา: Safiuddin, Abdus Salam, and Jumaat, (2011); Foo K and Hameed, (2009)

องค์ประกอบเคมี	เถ้าปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ASTM C618		
		ประเภท C	ประเภท F	ประเภท N
SiO_2	40-66	-	-	-
Al_2O_3	1.5-14.3	-	-	-
Fe_2O_3	1.4-8.4	-	-	-

องค์ประกอบเคมี	เถ้าปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ASTM C618		
		ประเภท C	ประเภท F	ประเภท N
SiO_2+Al_2O_3+ Fe_2O_3	55-70	50 (ไม่ต่ำกว่า)	70 (ไม่ต่ำกว่า)	70 (ไม่ต่ำกว่า)
CaO	4-10	-	-	-
MgO	2-7	-	-	-
K_2O	2-12	-	-	-
Na_2O	0.1-4.7	1.5 (ไม่เกิน)	1.5 (ไม่เกิน)	1.5 (ไม่เกิน)
SO_3	0.2-3	5 (ไม่เกิน)	5 (ไม่เกิน)	5 (ไม่เกิน)
LOI	0.1-21.5	6 (ไม่เกิน)	6 (ไม่เกิน)	(ไม่เกิน)

2.3.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2561)

1) เพื่อให้เกิดการประสานในเนื้อคอนกรีต (Cementation) หรือปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) หรือทั้ง 2 อย่าง

2) เพื่อให้ได้สมบัติอื่นที่ต้องอาศัยความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “เถ้าปาล์มน้ำมัน”

3) เถ้าปาล์มน้ำมันแบ่งตามคุณลักษณะทางเคมีและคุณลักษณะทางฟิสิกส์ ได้เป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ

ชั้นคุณภาพ 1 ใช้สำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่ว ๆ ไป

ชั้นคุณภาพ 2 ใช้สำหรับงานคอนกรีตที่ไม่ใช่งานโครงสร้าง

4) คุณลักษณะที่ต้องการ

ตารางที่ 2-2 คุณลักษณะทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

รายการที่	คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด	
			ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2
1	ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมินัมออกไซด์และไอรอนออกไซด์ ไม่น้อยกว่า	%	50	50
2	แคลเซียมออกไซด์ ไม่เกิน	%	10	ไม่พิจารณา
3	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ไม่เกิน	%	3	3
4	ปริมาณความชื้น ไม่เกิน	% เศษส่วนโดยมวล	3	3
5	มวลที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ไม่เกิน	% เศษส่วนโดยมวล	12	15

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2561

ตารางที่ 2-3 คุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าปาล์มน้ำมัน

รายการที่	คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด (หน่วยเป็นร้อยละ)	
			ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2
1	ความละเอียด ปริมาณค้างบนตะแกรง 325 โดยร่อนเปียก ไม่เกิน	%	10	30
2	ดัชนีกำลัง เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่น้อยกว่า			
	อายุ 7 วัน	%	75	70
	อายุ 28 วัน	%	75	70
3	ปริมาณน้ำที่ต้องการ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกิน	%	105	110
4	การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธีใช้หม้ออัดไอน้ำ ไม่เกิน	%	0.8	0.8

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2561

2.4 อิฐบล็อกประสาน (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2556)

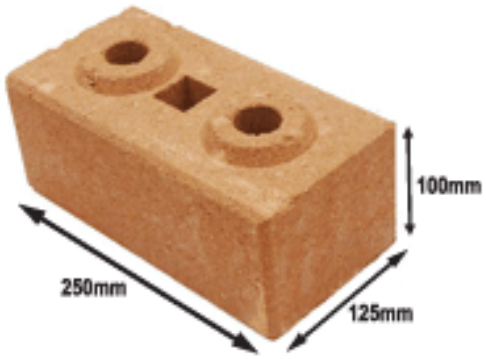
อิฐบล็อกประสาน คือ วัสดุก่อรับน้ำหนักที่ได้ทำการพัฒนารูปแบบให้มีรูและเดือยบนตัวบล็อกเพื่อให้สะดวกในการก่อสร้าง โดยเน้นการใช้วัตถุดิบในพื้นที่ได้แก่ ดินลูกรัง หินฝุ่น ทรายหรือวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสมนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม อัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดแล้วนำมาบ่มให้บล็อกแข็งตัวประมาณ 10 วัน จะได้อิฐบล็อกประสานที่มีความแข็งแรงมีรูปลักษณะพิเศษที่สามารถใช้ในการก่อสร้างอาคารต่าง ๆ หรือก่อเป็นถังเก็บน้ำได้อย่างรวดเร็วสวยงาม และประหยัดกว่างานก่อสร้างทั่วไป สามารถแบ่งการใช้งานเป็น 2 ประเภทเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน

1. คุณสมบัติทางกลของบล็อกประสานตามมาตรฐาน มผช.

คุณภาพของบล็อกประสาน ควรเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสานออกเป็น 2 ประเภท คือ

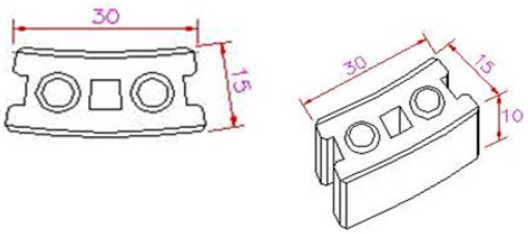
1) ชนิดรับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ก่อเพื่อรับน้ำหนักโครงสร้างของอาคารได้ เช่น ก่อเสา ก่อผนัง จะต้องมีค่าความต้านทานกำลังอัดไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2) ชนิดไม่รับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ในการก่อผนังกั้นห้องหรือก่อส่วนอื่นภายในอาคารที่ไม่ใช่ส่วนที่ต้องรับน้ำหนักโครงสร้างอาคาร จะมีค่าความต้านทานกำลังอัดไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 2-1 อิฐบล็อกประสานขนาด 12.5 x 25 x 10 เซนติเมตร (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2556)

ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างอาคารอิฐบล็อกประสาน (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2556)



ภาพที่ 2-3 อิฐบล็อกประสานโค้งขนาด 15 x 30 x 10 เซนติเมตร (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2556)

ภาพที่ 2-4 ถังน้ำอิฐบล็อกประสาน (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2556)

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของอิฐบล็อกประสาน

2.4.1.1 ลักษณะของดินมวลรวม

ดินในแต่ละแหล่งจะมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ไม่เหมือนกัน ดินบางประเภทเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน แต่บางประเภทก็ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งดินที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ควรมีคุณสมบัติที่สำคัญต่าง ๆ ตามที่ได้มีการแนะนำไว้ดังนี้

1. ดินลูกรังจะมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.7 ถึง 3.0 และจากลักษณะภายนอกจะเห็นได้ชัดว่าดินจะมีสีน้ำตาลแดงมีรูปร่างเป็นก้อนเหลี่ยมมน (วรากร, จิราพัฒน์, และประทีป, 2525)

2. ปริมาณความชื้นของดินที่เหมาะสมนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสานควรมีปริมาณความชื้นร้อยละ 1.5 ถึง 2.0 หลังจากผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียสและถ้าดินมีความชื้นมากเกินควรนำดินไปตากให้แห้ง (แผนธุรกิจอิฐบล็อกประสาน, 2550)

3. การผลิตอิฐบล็อกประสานให้ได้คุณภาพ วัตถุต้องอยู่ในสภาพที่แห้ง เพราะปริมาณความชื้นที่มากเกินจะมีผลต่อการผสมคลุกเคล้ามวลรวมกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน ถ้าปริมาณความชื้นมากส่วนผสมจะเกาะกันเป็นก้อนทำให้ส่วนคลุกเคล้าเข้ากันได้ไม่ดี ทำให้ความแข็งแรงของอิฐบล็อกประสานลดลง (วุฒินัย และพิชิต, 2552)

4. ความเหนียวของดินก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของอิฐบล็อกประสาน กล่าวคือ ดิน ที่มีความเหนียวมาก ๆ จะไม่เหมาะสมสำหรับทำอิฐบล็อกประสาน เนื่องจากทำให้การบดอัดให้แน่นทำได้ยาก และเมื่อความชื้นเพิ่มจะทำให้อิฐบล็อกประสานเกิดพองตัว ดังนั้นดินที่เหมาะสมควรมีขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) ไม่เกินร้อยละ 50 และดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ไม่เกินร้อยละ 18

2.4.1.2 ปริมาณปูนซีเมนต์

การทำอิฐบล็อกประสาน หากใช้ปูนซีเมนต์มากจะช่วยให้ความแข็งแรงคงทนขึ้นด้วย ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ใช้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.4.1.3 ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมอิฐบล็อกประสานดินซีเมนต์ สามารถหาได้จากการทดสอบการบดอัดของดิน โดยพิจารณาเลือกจากจุดที่มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และปริมาณความชื้นสูงสุด (Optimum Moisture Content) ซึ่งเป็นจุดสูงสุดของโค้ง ที่มีปริมาณน้ำเหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้ให้ความชื้นแก่ส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสาน (แผนธุรกิจอิฐบล็อกประสาน, 2550)

2.4.1.4 การบ่ม

การบ่มเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานดินซีเมนต์ เพราะช่วยป้องกันไม่ให้ความชื้นในบล็อกประสานดินซีเมนต์หายไป และยังทำให้การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยกำลังของอิฐบล็อกประสานดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มซึ่งปกติการบ่มควรใช้เวลาอย่างน้อย 7 วัน

2.5 วัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับทำอิฐบล็อกประสาน

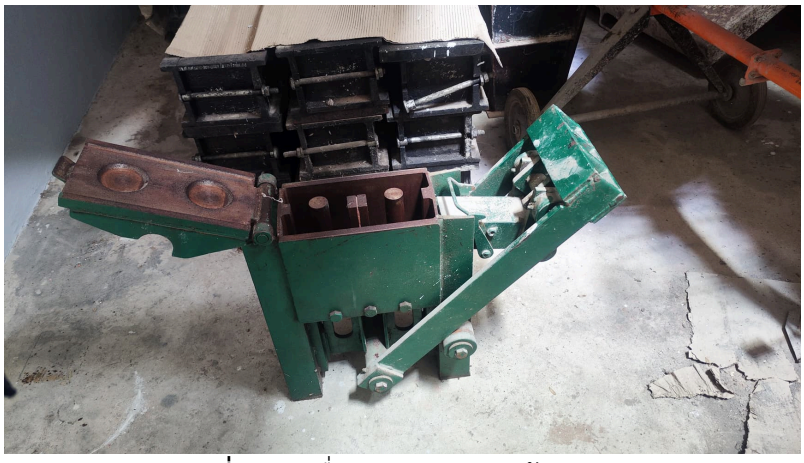
วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมหรือมวลรวมละเอียดของอิฐบล็อกประสานควรมีขนาดเล็กกว่า 4 มิลลิเมตร ได้แก่ ดินลูกรัง หินฝุ่น ทราย และเถ้าลอย (Fly ash) จากโรงงานผลิตไฟฟ้า โดยมวลรวมละเอียดที่ใช้ควรมีลักษณะตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพดิน และมวลรวมสำหรับงานก่อสร้างทางหลวง (ASTM D 3282 Standard Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes) คือมีฝุ่นดินไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก หรือทดสอบเบื้องต้นโดยนำดินใส่ขวดครึ่งหนึ่งเติมน้ำแล้วเขย่าให้เข้ากันเมื่อหยุดเขย่าสังเกตส่วนที่ตกตะกอนทันทีแล้วขีดเส้นไว้รอจนตกตะกอนทั้งหมดจนน้ำใสแล้ววัดตะกอนฝุ่นไม่ควรเกินร้อยละ 15 โดยปริมาตร ถ้าวัตถุดิบมีมวลหยาบผสมอยู่มากสามารถใช้เครื่องบดร่อนจะทำให้ผิวบล็อกเรียบขึ้น (สำเร็จ, 2556)

2.6.1 ปูนซีเมนต์สำหรับงานอิฐบล็อกประสาน คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปูนโครงสร้าง)จะทำให้อิฐบล็อกประสานมีความแข็งแรงทนการกัดกร่อนของน้ำได้ดี การใช้ปูนซีเมนต์ผสม (ปูนก่อฉาบ) คุณภาพจะต่ำกว่าทำให้ต้องใช้ปริมาณปูนมากขึ้น เพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานเดียวกันซึ่งจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้น

2.5.2 ส่วนผสมของอิฐบล็อกประสาน คือส่วนผสมของอิฐบล็อกประสานที่เหมาะสมควรทำการทดลองในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่มีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมประมาณ 1:6 ถึง 1:7 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของมวลรวมเป็นหลัก

2.5.3 เครื่องอัดอิฐบล็อกประสาน

1) เครื่องอัดด้วยแรงคนแบบมือโยกใช้การทดแรงแบบคานงัดคานดีดสามารถผลิตได้วันละประมาณ 400 ถึง 800 ก้อน ขึ้นอยู่กับจำนวนแรงงานและความชำนาญ



ภาพที่ 2-5 เครื่องอัดอิฐประสานด้วยแรงคน

2) เครื่องอัดแบบอุตสาหกรรมขนาดย่อมใช้มอเตอร์เป็นตัวขับน้ำมันสร้างแรงดันท่อไฮดรอลิคสามารถผลิตได้วันละประมาณ 1,000 ถึง 1,300 ก้อน อัดได้ครั้งละ 2 ถึง 4 ก้อน

ภาพที่ 2-6 เครื่องอัดอิฐประสานแบบอุตสาหกรรมขนาดย่อม

2.5.4 ของเสียที่เหมาะสมในการแปรรูปเป็นอิฐบล็อกประสานและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียที่ต้องพิจารณา (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555)

1) คุณสมบัติของเสียที่ต้องพิจารณา จากวัตถุดิบที่ต้องใช้ในการผลิตอิฐบล็อกประสาน 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุมวลรวมปูนซีเมนต์และน้ำปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ส่วนวัสดุมวลรวม เช่น ดินลูกรังหินฝุ่น ทราย และเถ้าลอย จะทำหน้าที่โครงสร้างของอิฐบล็อกประสาน ดังนั้น

การนำของเสียมาใช้ประโยชน์โดยการแปรรูปเป็นบล็อกประสานจึงเป็นไปในลักษณะเดียวกับการผลิตคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์คอนกรีตอื่น ๆ นั่นคือ สามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 แนวทาง ได้แก่

แนวทางที่ 1 ใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน

แนวทางที่ 2 ใช้เป็นวัสดุทดแทนดินลูกรัง หินฝุ่น ทราย ซึ่งเป็นวัสดุมวลรวม

2) เกณฑ์คุณสมบัติของเสีย ที่สามารถใช้เป็นตัวประสานทดแทนปูนซีเมนต์ ของเสียที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์หรือทำหน้าที่เป็นตัวประสานจะต้องมีคุณสมบัติที่เป็นซีเมนต์คล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ นั่นคือ มีปูนขาวเป็นองค์ประกอบหลักแต่หากไม่มีคุณสมบัติซีเมนต์หรือมีความเป็นซีเมนต์อยู่น้อย ก็จะต้องมีคุณสมบัติปอซโซลาน กล่าวคือมีซิลิกาหรือซิลิกาผสมกับอลูมิน่าเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวและจะทำให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์ (Cementatious Material) โดยเกณฑ์คุณสมบัติของเสียที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้แสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของเสียที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555)

องค์ประกอบทางเคมี	กรณีมีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์	กรณีมีคุณสมบัติปอซโซลาน
CaO	≥ 50	-
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	≥ 50
SO_3	≤ 5.0	≤ 5.0
LOI	≤ 6.0	≤ 6.0

หมายเหตุ : หน่วยต่อร้อยละโดยน้ำหนัก

3) เกณฑ์คุณสมบัติของเสียที่สามารถใช้เป็นวัสดุมวลรวมของเสียที่สามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุมวลรวมจะต้องมีความคงทนแข็งแรงแห้งไม่จับตัวเป็นก้อนสะอาดปราศจากวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ที่อาจทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสานต่ำลง โดยต้องมีขนาดเล็กกว่า 4 มิลลิเมตร หรือเป็นวัสดุมวลละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และมีวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.3 มิลลิเมตรหรือผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นโครงสร้างและเพิ่มความแข็งแกร่งให้อิฐบล็อกประสาน

(1) ลักษณะกายภาพมีความคงทนแข็งแรงและไม่จับตัวเป็นก้อนสะอาด

(2) ขนาดอนุภาคของของเสียผ่านตะแกรงเบอร์ 4 คิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณทั้งหมดผ่านตะแกรงเบอร์ 50 คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณทั้งหมด

2.5.5 การผลิตอิฐบล็อกประสานจากของเสียอุตสาหกรรม

การผลิตอิฐบล็อกประสานจากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง การนำของเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง คือคุณสมบัติปอซโซลานและคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมมาผสมกับปูนซีเมนต์และทราย หรือดิน หรือวัสดุมวลรวมอื่น ๆ ในอัตราที่เหมาะสมแล้วนำ

ส่วนผสมไปอัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดบล็อกประสานเพื่ออัดให้บล็อก มีรูปร่างตามที่ต้องการจากนั้นนำบล็อกที่อัดได้ไปบ่มเป็นระยะเวลา 10 ถึง 28 วัน เพื่อให้บล็อก มีความแข็งแรงก่อนจะนำไปใช้งานก่อสร้างต่อไป

(1) ความเหมาะสมในการนำมาใช้จัดการกับของเสียอุตสาหกรรมการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาผลิตอิฐบล็อกประสานถือว่ามีความเหมาะสมเนื่องจากอิฐบล็อกประสานที่ผลิตได้เป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้งานได้ง่ายและทำให้ต้นทุนการก่อสร้างต่ำกว่าบล็อกทั่วไปเนื่องจากก่อเป็นแนวได้โดยไม่ต้องใช้ปูนฉาบอีกทั้งมีรูปแบบก้อนทั้งแบบตรงและแบบโค้ง รวมถึงสามารถทำลวดลายบนตัวบล็อกได้ จึงมีความสวยงามเมื่อนำไปก่อสร้าง

(2) ช่วยลดต้นทุนการกำจัดของเสียของโรงงานขณะเดียวกันหากโรงงานนำอิฐบล็อกประสานที่ผลิตได้ไปใช้ในงานก่อสิ่งปลูกสร้างของโรงงานก็จะเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายวัสดุก่อสร้างที่ต้องจัดหาด้วย

(3) ช่วยลดต้นทุนการจัดหาเชื้อเพลิงเข้ามาใช้ในโรงงาน

(4) กรรมวิธีการผลิตอิฐบล็อกประสานไม่ยุ่งยากและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงพนักงานทั่วไปที่ได้รับการอบรมการใช้งานแล้วก็สามารถดำเนินการผลิตได้เองไม่ต้องใช้ทรัพยากรบุคคลของโรงงานที่มักมีอยู่จำกัดมากนัก

(5) กระบวนการผลิตและการนำอิฐบล็อกประสานไปใช้งานไม่ก่อให้เกิดมลพิษใด ๆ

(6) อัตราการผลิตอิฐบล็อกประสานสามารถปรับให้เหมาะสมกับปริมาณของเสียเนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้มีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ในกรณีที่โรงงานผู้ก่อกำเนิดของเสียต้องการนำมาใช้จัดการกับของเสียที่ก่อให้เกิดขึ้นสามารถเลือกเครื่องจักรที่มีกำลังผลิตสอดคล้องกับปริมาณของเสียได้

2.5.6 ขั้นตอนที่ต้องดำเนินการเมื่อจะนำของเสียอุตสาหกรรมมาผลิตอิฐบล็อกประสานแม้ว่าการนำของเสียมาผลิตอิฐบล็อกประสานจะเป็นการนำของเสียมาผสมกับปูนซีเมนต์ และนำไปอัดเป็นก้อน ก่อนบ่มให้เป็นก้อนแข็งก่อนนำไปใช้งานซึ่งคล้ายคลึงกับหลักการฝังกลบของเสียอย่างปลอดภัย (Secure Landfill) ที่ใช้ซีเมนต์ในการทำให้ของเสียเป็นก้อนแข็งก่อนนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย แต่ด้วยอิฐบล็อกประสานมีความแข็งแรงน้อยกว่าที่กำหนดในมาตรฐานของการทำก้อนซีเมนต์ ก่อนนำไปฝังกลบ อีกทั้งวิธีการฝังกลบอย่างปลอดภัยยังมีมาตรการป้องกันการรั่วไหลของสารมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมที่มีมาตรฐานสูง ดังนั้นการนำของเสียอุตสาหกรรมมาผลิตอิฐบล็อกประสานจะต้องประเมินความเหมาะสม และความปลอดภัยในการนำของเสียมาผลิตอิฐบล็อกประสาน และการนำอิฐบล็อกประสานไปใช้งานหากของเสียนั้นมีความเหมาะสมจึงทำการคัดเลือก และกำหนดรูปแบบขั้นตอนการผลิตอิฐบล็อกประสาน และลงมือผลิตตามขั้นตอนที่กำหนด

2.5.7 ประเมินความเหมาะสมในการนำของเสียมาผลิตอิฐบล็อกประสาน

เป็นขั้นตอนที่สำคัญก่อนนำของเสียอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นอิฐบล็อกประสานโดยการตรวจสอบที่มาของของเสียลักษณะทางกายภาพ และลักษณะทางเคมีของของเสียเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้และความปลอดภัยในการนำของเสียนั้น ๆ มาแปรรูปให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงและนำไปใช้งาน ขณะเดียวกันข้อมูลที่ได้ยังช่วยให้สามารถกำหนดรูปแบบขั้นตอนการผลิตโดยประเด็นที่ควรตรวจสอบเกี่ยวกับของเสียดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-5 การประเมินความเหมาะสมในการนำของเสียมาผลิตอิฐบล็อกประสาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555)

	ประเด็นที่ต้องตรวจสอบ	การนำข้อมูลที่ตรวจสอบไปใช้งาน
ที่มา	- ประเภทชนิดของเสียต้องคงเดิมและอัตราการเกิดของเสียสม่ำเสมอ - โอกาสในการปนเปื้อนสารอันตราย	เพื่อคัดเลือกขนาดเครื่องอัดอิฐบล็อกประสานและเครื่องจักรอื่น ๆให้เหมาะสมกับปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น เพื่อกำหนดชนิดสารอันตรายที่ควรวิเคราะห์
ลักษณะทางกายภาพ	- การผสมเป็นเนื้อเดียวกัน	เพื่อพิจารณาความจำเป็นในการทำให้ของเสียเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อความสม่ำเสมอในการเกิดปฏิกิริยากรณีเป็นวัสดุปอซโซลานและความสม่ำเสมอของมวลรวมในอิฐบล็อกประสาน
	- ขนาด	เพื่อพิจารณา - ความจำเป็นที่ต้องบดย่อยของเสียเพื่อเพิ่มความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน - ความเหมาะสมของอนุภาคในการเป็นวัสดุมวลรวม
ลักษณะทางเคมี	- การปนเปื้อนสารอันตราย	เพื่อให้ทราบข้อจำกัดของปริมาณมวลสาร ที่เป็นอันตรายในของเสียที่จะไม่ทำให้บล็อกประสานเป็นของเสียอันตราย
	- คุณสมบัติปอซโซลาน	ใช้บ่งชี้ความเหมาะสมในการนำมาผลิตบล็อกประสานโดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณสมบัติที่สำคัญ

2.6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสาน

คุณภาพของอิฐบล็อกประสานควรเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน 602/2547 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) สรุปได้ดังนี้

2.6.1 จำแนกอิฐบล็อกประสานออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ชนิดรับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ก่อเพื่อรับน้ำหนักโครงสร้างอาคารได้ เช่น ก่อเสาก่อผนัง

2. ชนิดไม่รับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ก่อผนังกั้นห้อง หรือก่อส่วนอื่นภายในอาคารที่ไม่ใช่ส่วนที่ต้องรับน้ำหนักโครงสร้างอาคาร

กำหนดคุณลักษณะของอิฐบล็อกประสานทั้งในด้านลักษณะทั่วไป มิติ กำลังต้านแรงอัด และการดูดกลืนน้ำดังแสดงในตารางที่ 2-6 และตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-6 คุณลักษณะอิฐบล็อกประสานที่ต้องการ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

ลักษณะทั่วไป	ต้องไม่มีรอยแตกหรือร้าวอาจบิ่นได้เล็กน้อย
มิติ	ต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลากโดยแต่ละมิติมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ ไม่เกิน ±2 มิลลิเมตร
ความต้านแรงอัด	ชนิดรับน้ำหนักค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
	ชนิดไม่รับน้ำหนักค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 2-7 การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

น้ำหนักอิฐบล็อกประสานเมื่ออบแห้ง (กิโลกรัม)	การดูดกลืนน้ำสูงสุดเฉลี่ยจากอิฐบล็อกประสาน 5 ก้อน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1,680 และน้อยกว่า	288
1,681 ถึง 1,760	272
1,761 ถึง 1,840	256
1,841 ถึง 1,920	240
1,921 ถึง 2,000	224
มากกว่า 2,000	208

หมายเหตุ : กำหนดเฉพาะชนิดรับน้ำหนัก

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พนาทอง (2548) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและยิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยศึกษาคุณสมบัติเชิงกลคือ ความต้านทานความเค้นอัดและความต้านทานโมเมนต์ดัด และศึกษาคุณสมบัติเชิงความร้อนคือการนำความร้อน รวมไปถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพคือ ความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ตัวอย่างของอิฐเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศา

เซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยเป็น 0, 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยิปซัม 0, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นดินเหนียว ผลจากการศึกษาพบว่า ที่ส่วนผสมยิปซัม 10% ที่ทุกสัดส่วนของเถ้าลอย ค่าความต้านทานความเค้นอัดและค่าความต้านทานโมเมนต์ดัดจะสูงกว่าที่ส่วนผสมต่ำกว่าหรือสูงกว่า 10%

วุฒินัย และนรา (2548) ศึกษาผลิตอิฐบล็อกประสานจากหน้าดินขาวที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตดินขาวเพื่ออุตสาหกรรมที่มีจำนวนมาก จะใช้หน้าดินขาวจากเหมืองแร่ Mineral Resources Development จังหวัดระนอง เป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐบล็อกประสานโดยผสมที่อัตราส่วนหน้าดินต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:5 1:7 และ 1:9 โดยน้ำหนัก และทดสอบหลังการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วันตามลำดับ พบว่าบล็อกประสานที่ผลิตจากหน้าดินขาวมีค่าความสามารถในการรับแรงอัดได้สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด (มาตรฐานในการรับกำลังอัดของอิฐบล็อกประสานต้องไม่ต่ำกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) จากการวิจัยสรุปได้ว่าหน้าดินขาวสามารถนำมาใช้ผลิตอิฐบล็อกประสานได้เป็นอย่างดี จึงนับได้ว่าเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาสร้างมูลค่าเพิ่มและเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งทำให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ณิชาดา, มณฑล, และ ภัทรา (2555) ศึกษาการนำกากตะกอนเคมีจากกระบวนการผลิตน้ำประปา มาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มอร์ต้า และอิฐบล็อกประสาน จากการศึกษาพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของซีเมนต์มอร์ต้าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนกากตะกอนเคมี ส่วนในด้านการรับกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่ผสมกากตะกอนเคมีพบว่า อิฐบล็อกประสานที่ผสมกากตะกอนเคมีร้อยล่ะ 10 - 30 ผ่านมาตรฐานชั้นคุณภาพ ก. (มีความแข็งแรงและสามารถทนการกัดกร่อนของน้ำได้ดี) สำหรับอิฐบล็อกประสานที่ผสมกากตะกอนเคมีร้อยล่ะ 40 - 50 ผ่านมาตรฐานชั้นคุณภาพ ข. (มีความแข็งแรง สามารถทนการกัดกร่อนของน้ำได้ดีในระดับหนึ่ง ควรมีการฉาบป้องการผิวเมื่อใช้งานในที่เปียกชื้น) และอิฐบล็อกประสานที่ผสมกากตะกอนเคมีร้อยละ 70 ผ่านมาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก จากผลการศึกษาที่ได้ทำให้ทราบว่ากากตะกอนเคมีจากการผลิตน้ำประปาสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการก่อและฉาบได้ และการใช้กากตะกอนในอิฐบล็อกประสานที่ร้อยละ 10 - 30 มีความเป็นไปได้อย่างมากในการนำไปใช้จริงต่อไป

ฐิติพงษ์ และคณะ (2554) ศึกษาอิทธิพลของซีเมนต์ที่มีผลต่อคุณสมบัติของอิฐบล็อกประสานโดยมีส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป โดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อมวลรวม จาก 1:3 ถึง 1:11 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คงที่เท่ากับ 0.103 ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นอิฐบล็อกประสาน 2 ร่อง ชนิด 3 รูเสียบ ขนาด 25 x 12.5 x 10 เซนติเมตร บ่มด้วยความชื้นที่อายุ 7 14 และ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำ จากผลการศึกษา พบว่า อิฐบล็อกประสานมีกำลังอัดที่สูงสุดคือ อัตราส่วนที่ 1:3 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 204 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 10.77 เปอร์เซ็นต์ แต่จะใช้ซีเมนต์ในการ

ผลิตมาก และมีค่าใช้จ่ายสูง และอัตราส่วน 1:7 เป็นอัตราส่วน ที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม 57 - 2553 และมีราคาที่ประหยัดที่สุดในการผลิต ค่ากำลังรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 91 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด เท่ากับ 14.94 เปอร์เซ็นต์

พงศ์ภูมิ (2555) ศึกษาบล็อกประสานที่มีส่วนผสมเถ้าหนักทดแทนปูนซีเมนต์ เป็นการศึกษาคุณสมบัติของบล็อกประสานที่ผลิตขึ้นในอัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่อัตราส่วน 1 : 5, 1 : 6, 1 : 7, 1 : 8 และ1 : 9 โดยน้ำหนัก ซึ่งในแต่ละส่วนผสมจะผสมเถ้าหนักที่ปริมาณร้อยละ 0 , 5 ,10 และ 15 แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด คือ 72.951 กก/ลบ.ซม ที่อัตราส่วน 1 : 6 ปริมาณเถ้าหนักร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุด คือ 55.045 กก/ลบ.ซม ที่อัตราส่วน 1: 9 โดยมีปริมาณเถ้าหนักร้อยละ 15 ซึ่งมีส่วนผสมของดินลูกรังมาก และมีปริมาณของเถ้าหนักที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มากที่สุดทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าเกณฑ์ของมาตรฐาน

จรูญ (2555) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าใยปาล์มน้ำมัน มาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อผลิตเป็นอิฐบล็อกประสาน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในอัตราส่วนร้อยละ10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ใช้มวลรวม คือดินลูกรัง และทรายละเอียดที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์4 บ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน นำอิฐบล็อกประสานที่ได้มาทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และกำลังอัดของอิฐบล็อกประสานก่อสูง 5 ก้อน จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณของเถ้าใยปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง และมีการดูดซึมน้ำสูงขึ้น เมื่อนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.602/2547) พบว่าบล็อกประสานที่มีเถ้าใยปาล์มน้ำมันที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก และอัตราส่วนอื่นๆ ผ่านมาตรฐานชนิดไม่รับน้ำหนัก

สำเร็จ (2556) ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐบล็อกประสานที่ใช้ในงานโครงสร้างไม่รับแรงแบกทาน รวมทั้งนำเสนออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสม กำลังอัดของอิฐบล็อกประสานในงานโครงสร้างไม่รับแรงแบกทานต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 1:6 และ 1:8 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กันในทางปฏิบัติผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จนถึงร้อยละ 30 (ค่าเหมาะสม) หลังจากนั้น ความหนาแน่นแห้งจะมีค่าลดลง กำลังอัดของอิฐบล็อกประสานมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแม้ว่าหน่วยน้ำหนักจะมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับผลิตอิฐบล็อกประสานในงานโครงสร้างไม่รับแรงแบกทานคือ 1:8 หากพิจารณากำลังรับแรงอัดที่เท่ากับ 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตรา

ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมเท่ากับ 92:8, 87:13 และ 60:40 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วันด้วยต้นทุนการผลิตต่อหน่วยเท่ากับ 1.90, 1.85 และ 1.58 บาท

ปกป้อง (2557) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจากนิคมบาเจาะ อำเภอบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนเท่ากับ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำาหนักวัสดุประสาน และควบคุมอัตราส่วนน้ำาต่อวัสดุประสานของคอนกรีตให้มีค่าเท่ากับ 0.62 ทำาการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสด ซึ่งได้แก่ ค่าการยุบตัวการเยิ้มน้ำ และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้คอนกรีตมีการค่าการยุบตัวลดลง มีการเยิ้มน้ำสูงขึ้น และมีระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตจะนานขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

สุริยา (2557) ศึกษากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานที่ผลิตจากปูนซีเมนต์และเปลือกหอยเชอรี่บด สรุปงานวิจัยได้ว่าสำหรับอัตราส่วนปูนซีเมนต์ผสมเปลือกหอยต่อดินเท่ากับ 1:6 ความชื้นเหมาะสมมีค่าประมาณร้อยละ 12 ของน้ำหนักดินลูกรังและเปลือกหอยเชอรี่ สำหรับทุกอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยเชอรี่ ความหนาแน่นสูงสุดมีค่าประมาณ 1.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสาหรับอัตราส่วนปูนซีเมนต์ผสมเปลือกหอยต่อดินเท่ากับ 1:8 ความแน่นแห้งสูงสุดมีค่าประมาณ 1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าประมาณร้อยละ 11 สำหรับทุกอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยเชอรี่ กำลังอัดของดินลูกรังเปลือกหอยผสมปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วันมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานสาหรับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (2.5 เมกกะปาสคาล) ทุกอัตราส่วนผสม

สมพงษ์ และ สุภชัย (2560) ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยแทนที่กากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นในการผลิตอิฐบล็อกประสานตั้งแต่ 0% - 40% พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าตั้งแต่ 54 – 167.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้กำลังรับแรงอัดที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบแทนที่กากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นสูงสุด 30% ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก และอิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าแกลบมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าอิฐที่ผสมเถ้าลอย และยังมีความทนทานกว่าอิฐที่ผสมเถ้าลอยด้วย

บทที่ 3
วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) เถ้าปาล์มน้ำมัน (OPOFA) ที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จากโรงงานในจังหวัดสุราษฎร์ธานี (ภาพที่ 3-1) จากนั้นนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้ไปอบในตู้อบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ดังภาพที่ 3-2 ต่อมานำเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าเครื่องบดแบบตกกระทบ (Los Angeles Abrasion Machine) จนมีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 3-3

ภาพที่ 3-1 เถ้าปาล์มน้ำมัน (OPOFA) จากโรงงานในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

ภาพที่ 3-2 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA)

ภาพที่ 3-1 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

2) ปูนซีเมนต์ (OPC) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ภาพที่ 3-4 ตามมาตรฐาน ASTM C150 (American Society for Testing and Materials, 2018a)

ภาพที่ 3-4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3) ทรายแม่น้ำ (ภาพที่ 3-5) ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 ค้างตะแกรงมาตรฐาน 100 โดยมีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C33 (American Society for Testing and Materials, 2018b) ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง และค่าการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C128 (American Society for Testing and Materials, 2015) เพื่อใช้ในการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

ภาพที่ 3-5 ทรายแม่น้ำ

4) ดินลูกรังจากบ่อดินในพื้นที่ตำบลทุ่งปรัง อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ผึ่งแดดให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 3-6) แล้วนำไปทดสอบสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง เช่น การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะทดสอบการหาค่า Atterberg Limit

ภาพที่ 3-6 ดินลูกรัง

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพที่ 3-7 อุปกรณ์หาค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

ภาพที่ 3-8 แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม.

ภาพที่ 3-9 อุปกรณ์ชุดทดลองหาความถ่วงจำเพาะ

ภาพที่ 3-10 ตู้อบความร้อน

ภาพที่ 3-11 อุปกรณ์ชุดทดลองหาขีดการไหลตัวและขีดความอ่อนตัว

ภาพที่ 3-12 อุปกรณ์ชุดทดลองการบดอัด

ภาพที่ 3-13 อุปกรณ์ชุดทดลองหาขนาดโดยใช้ตะแกรง

ภาพที่ 3-14 เครื่องผสมดินลูกรัง

ภาพที่ 3-15 เครื่องทดสอบกำลังอัด

ภาพที่ 3-16 เครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบไฮดรอลิก

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบมอร์ตาร์

การเตรียมตัวอย่างในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2.75 โดยน้ำหนัก แทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) จากการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C1437 (American Society for Testing and Materials, 2007) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 (Kiattikomol, Jaturapitakkul, Songpiriyakij, and Chutubtim, 2001; Cheerarot and Jaturapitakkul, 2004; Chusilp, Jaturapitakkul and Kiattikomol, 2009; Pormmoon Abdulmatin, Charoenwaiyachet, Tangchirapat, and Jaturapitakkul, 2021) ดังแสดงในตารางที่ 3-1 จากนั้นหล่อตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ถอดแบบเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปบ่มน้ำสะอาด และทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตราฐาน ASTM C109 (American Society for Testing and Materials, 2013) ที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ได้มาจากค่าเฉลี่ยของ 5 ตัวอย่าง ซึ่งค่ากำลังอัดของแต่ละตัวอย่างที่ได้ต้องไม่เกินร้อยละ 8.7 ของค่าเฉลี่ยตามที่กำหนดโดย ASTM C109 (American Society for Testing and Materials, 2013)

ตารางที่ 3-1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

Sample	Mix Proportion by Weight (g)				Flow
	Cement	GPOFA	Sand	W/B	(%)
CT	100	-	275	0.57	114
20GPOFA	80	20	275	0.61	106
50GPOFA	50	50	275	0.65	111
60GPOFA	40	60	275	0.65	107
70GPOFA	30	70	275	0.68	114

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบอิฐบล็อกประสาน

อัตราส่วนผสมการทำอิฐบล็อกประสานที่ประกอบด้วยวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด) : ดินลูกรัง เท่ากับ 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยอัตราส่วนผสมและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบ แสดงในตารางที่ 3-2 และตารางที่ 3-3 โดยใช้เครื่องผสมวัสดุ และใช้เครื่องอัดบล็อกประสานแบบไฮดรอลิก แสดงในภาพที่ 3-

16 สำหรับตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมีขนาด กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร หนา 10 เซนติเมตร จากนั้น ทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน และทดสอบค่าการดูดกลืนน้ำที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช. 602/2547 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

ภาพที่ 3-17 ก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน

ตารางที่ 3-2 Mixture proportions (Binder : Lateritic soil, 1:6)

Interlocking block Symbols	kg/m^3				W/B	OMC (%)
	OPC	GPOFA	lateritic soil	Water		
CT-A	240	-	1,440	264	1.10	17.78
50GPOFA-A	120	120	1,440	264	1.10	17.78
60GPOFA-A	96	144	1,440	264	1.10	17.78
70GPOFA-A	72	168	1,440	264	1.10	17.78

Remark: OPC: Ordinary Portland Cement Type I, GPOFA: Ground Palm Oil Fuel Ash

ตารางที่ 3-3 Mixture proportions (Binder : Lateritic soil, 1:8)

Interlocking block Symbols	kg/m^3				W/B	OMC (%)
	OPC	GPOFA	lateritic soil	Water		
CT-B	187	-	1,496	206	1.10	17.17
50GPOFA-B	93.5	93.5	1,496	206	1.10	17.17
60GPOFA-B	74.8	112.2	1,496	206	1.10	17.17
70GPOFA-B	56.1	130.9	1,496	206	1.10	17.17

Remark: OPC: Ordinary Portland Cement Type I, GPOFA: Ground Palm Oil Fuel Ash

3.3 การผลิตอิฐบล็อกประสานตัวอย่าง

1) เตรียมวัตถุดิบโดยการบดร่อนดินลูกรังให้ผ่านตะแกรงขนาด 4 มม. ให้ได้ปริมาณมากพอที่จะทำการทดสอบได้

2) หาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) โดยการทำ Compaction Test ด้วยวิธี Modified Proctor Test ของแต่ละอัตราส่วนผสมแล้วนำค่า OMC ที่ได้มากำหนดเป็นปริมาณน้ำที่ต้องใช้เป็นส่วนผสมในการทำบล็อกประสานของแต่ละอัตราส่วน

3) นำวัสดุที่จะใช้คือปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ดินลูกรัง และน้ำมาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนดอัตราส่วนผสมระหว่าง (ปูนซีเมนต์ + เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด) ต่อลูกรังที่ใช้เท่ากับ 1:6 และ 1:8 โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1 จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คลุกเคล้าให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยถือว่าเป็นหนึ่งส่วน จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวมาผสมกับดินลูกรังที่เตรียมไว้ แล้วนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน (ใช้วิธีผสมแห้ง) เสร็จแล้วเติมน้ำตามอัตราส่วนของค่า OMC ที่หามาได้โดยใช้วิธีการพรมน้ำด้วยบัวรดน้ำแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำส่วนผสมที่ได้ที่แล้วไปอัดขึ้นรูปในเครื่องอัดบล็อกประสานแบบไฮดรอลิก ใช้แผ่นพลาสติกกันชื้นหุ้มบล็อกประสานที่ขึ้นรูปแล้วไปบ่มต่อจนอายุครบ 7, 28, 60 และ 90 วัน นำบล็อกประสานที่บ่มครบระยะเวลาแล้วไปทดสอบเพื่อหากำลังอัดของบล็อกประสาน (Compressive Strength) และการดูดกลืนน้ำ ที่ 28 วันเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

ตารางที่ 3-4 Number of Interlocking block 1:6, และ 1:8 (cement : lateritic soil)

Mixture	Number of Interlocking Block					
	Compressive Strength				Water absorption	Total (Block)
	7 Days	28 Days	60 Days	90 Days	28 Days	
CT	10	10	10	10	10	50
50GPOFA	10	10	10	10	10	50
60GPOFA	10	10	10	10	10	50
70GPOFA	10	10	10	10	10	50
Total	40	40	40	40	40	200

3.4 การขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานและการบ่ม

ขั้นตอนการขึ้นรูปอิฐบล็อกประสาน

1) ทดสอบดินลูกรังจากบ่อดินในพื้นที่ตำบลทุ่งปรัง อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช และกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสม

2) การเตรียมวัตถุดิบหากมีความชื้นมากควรนำไปตากให้แห้งและกองเก็บวัตถุดิบในที่ร่มให้มากเพียงพอที่จะทำการผลิตตลอดเวลา หากดินเป็นก้อน หรือมีมวลหยาบน้อย ควรร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 โดยใช้เฉพาะที่ค้างตะแกรงเบอร์ 100 เท่านั้น เนื่องจากที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 จะทำให้อิฐบล็อกประสานไม่มีความแข็งแรงเนื่องจากมีความละเอียดมากเกินไป

3) ในการผสมควรผสมดินแห้งหรือมวลรวมกับซีเมนต์ให้เข้ากันก่อน แล้วค่อย ๆ เติมน้ำ โดยใช้ฝักบัวหรือหัวฉีดพ่นให้เป็นละอองกว้าง น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำสะอาด ใช้ผสมหลังจากผสมดินและซีเมนต์เข้ากันแล้วในปริมาณที่พอเหมาะโดยใช้ปริมาณน้ำที่ดีที่สุด

ภาพที่ 3-18 การผสมอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 3-19 การอัดอิฐบล็อกประสานด้วยระบบไฮดรอลิค

ภาพที่ 3-20 การผึ่งอิฐบล็อกประสานในที่ร่ม

ภาพที่ 3-21 การบ่มอิฐบล็อกประสาน

4) หลังจากนั้นจึงนำดินที่ผสมแล้วเข้าเครื่องอัดโดยตวงวัดหน่วยเป็นน้ำหนัก เติมส่วนผสมลงในแบบอัดโดยใช้น้ำหนักมากที่สุดที่สามารถทำงานได้สะดวก ควรใช้ส่วนผสมให้หมดภายใน 30 นาที หลังจากผสมน้ำเพื่อป้องกันปูนเกาะตัวก่อนอัดขึ้นรูป

5) อิฐบล็อกประสานที่อัดเป็นก้อนแล้วควรผึ่งในที่ร่มอย่างน้อย 1 วัน จึงเริ่มบ่มที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน

วิธีการบ่ม

หลังจากนำอิฐบล็อกออกจากเครื่องอัดแล้วนำมาจัดเรียงในที่ร่มจนมีอายุครบ 1 วัน เริ่มบ่มโดยการรดน้ำด้วยฝักบัวหรือฉีดพ่นเป็นละอองให้ชุ่ม แล้วคลุมด้วยผ้าพลาสติกไม่ให้ไอน้ำระเหยออกทิ้งไว้อีก 6 วัน จนมีอายุครบ 7 วัน จนมีความแข็งแรงหรือใช้งานได้ ไม่ควรเคลื่อนย้ายก่อนกำหนดเพราะจะทำให้ก้อนอิฐบล็อกประสานบิ่น หรือเกิดความแตกร้าวได้ง่าย การบ่มไม่ควรให้น้ำมากเกินเพราะอาจทำให้มีปัญหาคราบขาวได้ควรบ่มด้วยปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้คือเพียงแค่ให้มีความชื้นก็เพียงพอ

3.5 การทดสอบอิฐบล็อกประสาน

การชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านแรงอัด และการทดสอบการดูดกลืนน้ำ ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ ลักษณะทั่วไป และมิติ เมื่อตรวจสอบแล้วจึงนำตัวอย่างไปทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน (มผช.602/2547) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ในอัตราส่วน 1:6 และ1:8 และการทดสอบการดูดกลืนน้ำของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน ที่ 28 วัน โดยนำค่าการทดสอบกำลังอัด และค่าการทดสอบการดูดกลืนน้ำของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐบล็อกประสานมาตรฐาน มผช. 602/2547 อิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก ค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 70 ksc หรือ 7.0 MPa และอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก ค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 25 ksc หรือ 2.5 MPa จากนั้นนำอิฐบล็อกประสานมาทดสอบกำลังอัดโดยใช้เครื่องทดสอบการรับกำลังอัด ในอัตราส่วน 1 :6 และ1 :8 และการทดสอบการดูดกลืนน้ำของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน ที่ 28 วัน โดยนำค่าการทดสอบกำลังอัด และค่าการทดสอบการดูดกลืนน้ำของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐบล็อกประสานมาตรฐาน มผช. 602/2547

3.5.1 วิธีทดสอบความต้านแรงอัด

1) นำอิฐตัวอย่างมาเขียนหมายเลข และทำเครื่องหมายให้ชัดเจน

2) วัดขนาดของตัวอย่างโดยการวัดความยาวของก้อนอิฐของหน้ายาวทั้ง 4 หน้าโดยวัดที่จุดกึ่งกลางของแต่ละด้าน บันทึกผล ทั้ง 4 ด้าน ให้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร และนำมาหาค่าเฉลี่ยให้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร และวัดความหนาและความกว้างของอิฐโดยวิธีเดียวกันกับการวัดความยาว

3) นำอิฐตัวอย่างมาเคลื่อนผิวด้วยปูนปลาสเตอร์ทั้งสองหน้าให้เรียบ แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

4) นำก้อนตัวอย่างมาวางในเครื่องทดสอบโดยวางในแนวของการก่ออิฐดังภาพที่ 3-25

5) บันทึกน้ำหนักครึ่งหนึ่งของน้ำหนักสูงสุดที่คาดว่าจะทดสอบและทำการบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดและทำซ้ำจนครบ

6) คำนวณความต้านแรงอัดของก้อนตัวอย่างทั้งหมด และนำมาหาค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน

3.5.2 การทดสอบการดูดกลืนน้ำ

1) นำวัสดุที่เตรียมไว้แล้ว มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ110 ± 5 องศาเซลเซียส ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปแช่ ลงในน้ำเป็นเวลาประมาณ 24 ± 1 ชั่วโมง

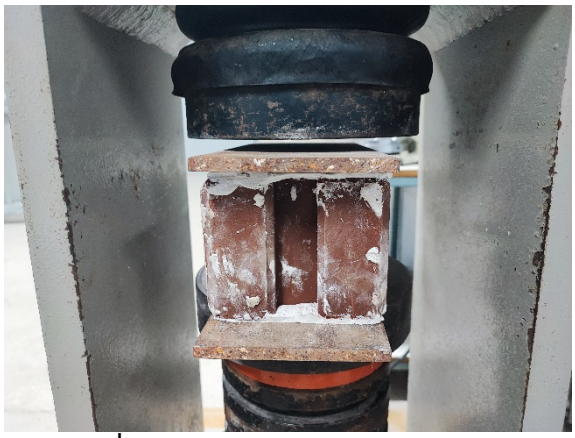
2) เอาวัสดุขึ้นจากน้ำ วางบนผ้าซับน้ำแล้วคลึงเช็ดวัสดุด้วยผ้าซับน้ำ จนกระทั่งชั้นบาง ๆ ของน้ำที่เคลือบผิววัสดุออกหมด แล้วรีบทำการชั่งวัสดุทันทีถึงแม้จะเห็นว่าผิววัสดุยังชื้น (Damp) อยู่ก็ตาม การชั่งให้ชั่งละเอียดถึง 0.5 กรัม มวลที่ได้เป็นมวลของวัสดุ Saturated Surface Dry ในอากาศ

3) นำวัสดุไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 1-3 ชั่วโมง แล้วชั่งหามวล มวลที่ได้เป็นมวลวัสดุอบแห้งในอากาศ

ภาพที่ 3-22 ลักษณะทั่วไปของอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 3-23 การตกแต่งอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 3-24 การเคลือบผิวด้วยปูนพลาสเตอร์



ภาพที่ 3-25 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

บทที่ 4
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึง ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุประสาน สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม ผลการทดสอบกำลังอัด การดูดกลืนน้ำ รวมถึงการวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต และการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอิฐบล็อกประสานที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในปริมาณสูง

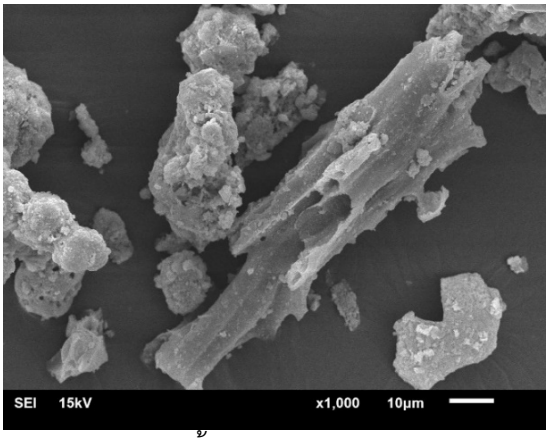
4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานและวัสดุผสม

4.1.1 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

โดยเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) ภาพที่ 4-1 (a) ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ลักษณะทั่วไปของ OPOFA ก่อนบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 73.9 ไมโครเมตร มีสีดำปนเทา เนื้อเถ้าหยาบ ไม่มีรูปทรงชัดเจน ภาพที่ 4-1 (b) หลังจากนำ OPOFA ไปทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบ (Los Angeles abrasion machine) เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง จะได้ GPOFA ภาพที่ 4-1 (c) ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร โดยการกระจายตัวของอนุภาคของ OPOFA และ GPOFA แสดงในภาพที่ 4-2 ซึ่งลักษณะทั่วไปของ GPOFA มีสีดำสนิท เนื้อเถ้ามีขนาดเล็กละเอียด ภาพที่ 4-1 (d) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.6, 1.2 และ 2.8 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบ เท่ากับร้อยละ 61.6 แสดงในตารางที่ 4-1 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมีของ GPOFA พบว่าอยู่ในเกณฑ์ชั้นคุณภาพที่ 1 ตามมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2561) เนื่องจากมีผลรวมขององค์ประกอบหลัก SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่า ร้อยละ 50 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 10 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 12 ตามมาตรฐาน มอก. 2888-2561 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2017) พบว่า GPOFA อยู่ในประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งมีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่มีค่า LOI เกินร้อยละ ตามมาตรฐาน ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2017) อยู่เล็กน้อย เมื่อพิจารณาโครงสร้างความเป็นผลึกของ GPOFA ด้วยเทคนิค X-ray diffraction

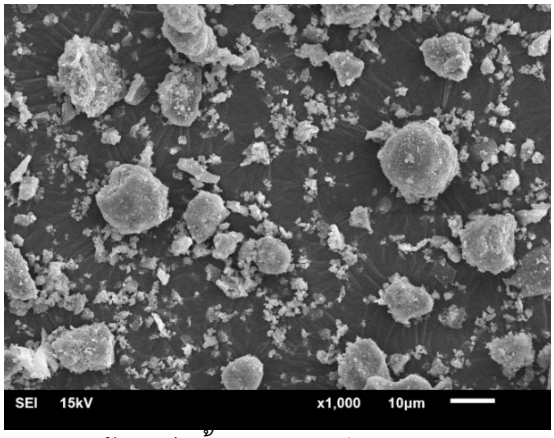
(XRD) พบว่า GPOFA มีองค์ประกอบหลัก คือ Quartz (SiO_2) โดยจุดยอด (Peak Intensity) จะปรากฏที่มุม 2-theta เท่ากับ 29.68 ซึ่งโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกมากจะทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาน้อยลง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งในการสลายพันธะต้องใช้พลังงานมาก ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดได้ยากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-3 (a)

(a) เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA)



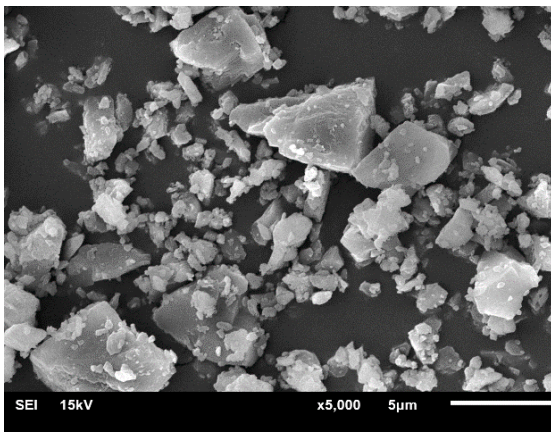
(b) เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า

(c) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



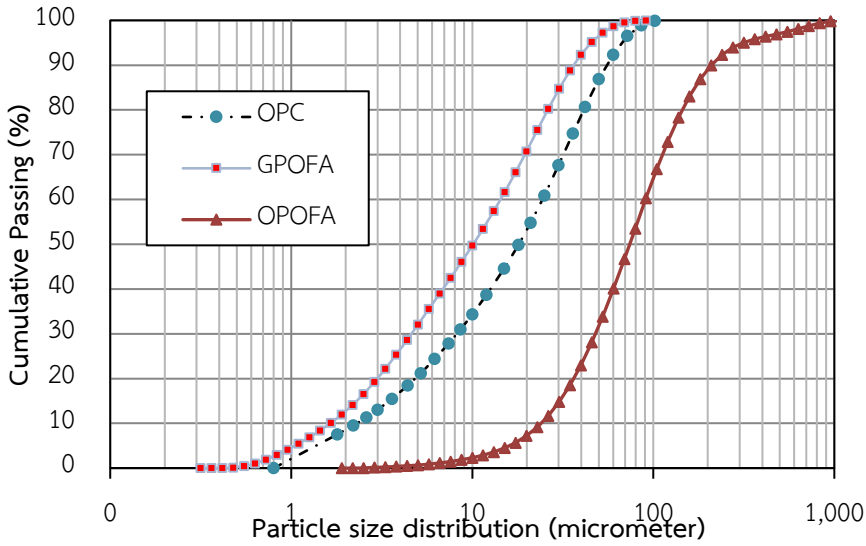
(d) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า

(e) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)



(f) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ทวิช, Trinh Nhat Ho, Sambath, วีรชาติ และ ชัย, 2565)

ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายขยายอนุภาค



ภาพที่ 4-2 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA)

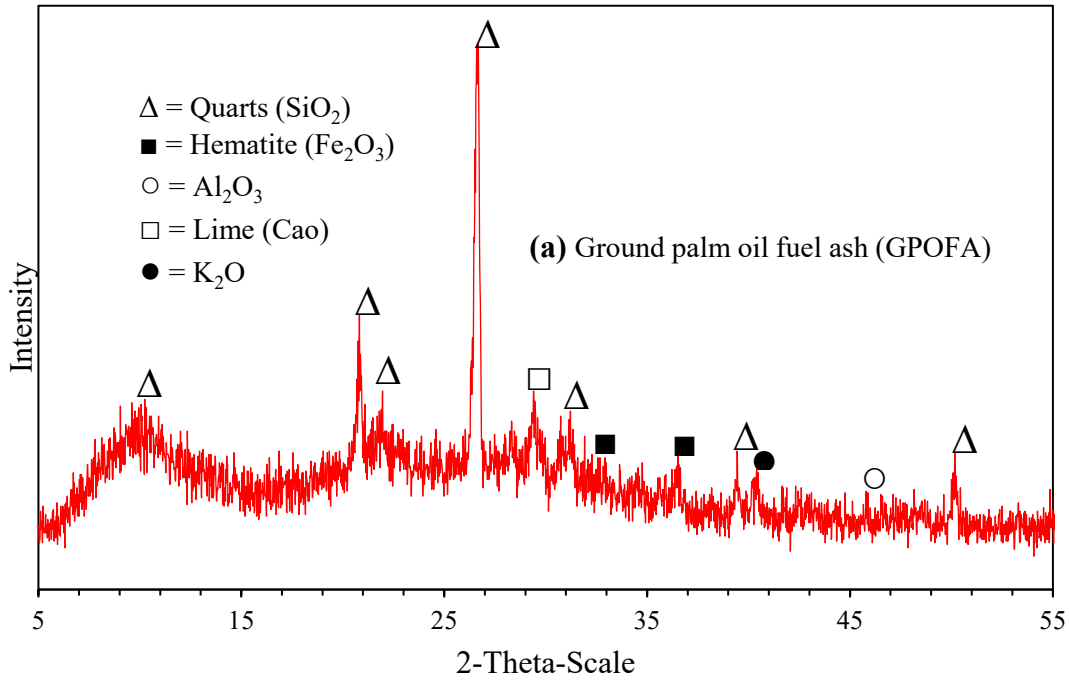
4.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แสดงในภาพที่ 4-1 (e) มีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 (American Society for Testing and Materials, 2018a) โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ CaO และ SiO_2 มีค่าร้อยละ 62.6 และ 20.0 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า LOI ร้อยละ 2.8 โดยทั่วไปมีสีเทาเข้ม เนื้อละเอียด มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีอนุภาคเล็กๆ เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 4-1 (f) (ทวิช, Trinh Nhat Ho, Sambath, วีร

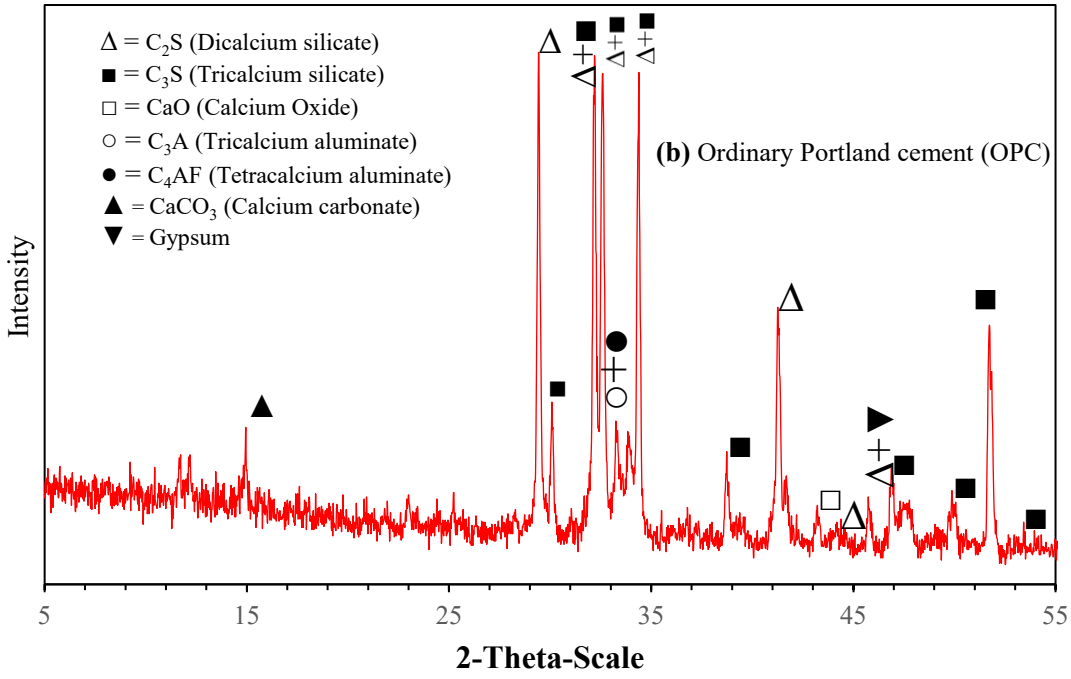
ชาติ และ ชัย, 2565) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 18.1 ไมโครเมตร โดยสมบัติทางเคมี และการกระจายตัวของอนุภาค ของ OPC แสดงในตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-2 ตามลำดับ นอกจากนี้หากพิจารณาลักษณะโครงสร้างของเฟสต่างๆ ด้วยเทคนิค XRD พบว่าตำแหน่งในการเกิดเฟส และความสูงของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะของเฟสต่างๆ ที่เกิดในปูนเม็ด ได้แก่ Tricalcium silicate (C_3S) จะมีลักษณะกลม Dicalcium silicate (C_2S) จะมีลักษณะเป็นแท่ง เหลี่ยม และ Tricalcium aluminite (C_3A) มีลักษณะเป็นเกล็ดกระจายอยู่ทั่วไป ภาพที่ 4-3 (b) (Klathae, Tran, Men, Jaturapitakkul, and Tangchirapat, 2021)

ตารางที่ 4-1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) และ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

Materials		OPC	GPOFA
Physical Properties	Specific gravity	3.16	2.65
	Median particle size, d_{50} (μm)	18.1	7.7
Chemical Composition (%)	Silicon dioxide (SiO_2)	20.0	57.6
	Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.6	1.2
	Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.8
	Calcium oxide (CaO)	62.6	9.6
	Magnesium oxide (MgO)	1.2	4.7
	Potassium oxide (K_2O)	2.7	8.7
	Sodium oxide (Na_2O)	0.3	0.1
	Sulfur trioxide (SO_3)	2.4	2.2
	Phosphorus Oxide (P_2O_5)	-	5.5
	Chorine (Cl)	-	1.1
	Loss on ignition (LOI)	2.8	6.5
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	61.6



(a) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



(b) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) (Klathae, Tran, Men, Jaturapitakkul, and Tangchirapat, 2021)

ภาพที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) ของวัสดุประสาน

4.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง (Lateritic Soil)

ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง เช่นค่าความถ่วงจาเพาะ และค่าการดูดกลืนน้ำ รวมถึงคุณสมบัติด้าน Atterberg Limit เพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง และหาค่าขีดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงลักษณะของดินลูกรัง แสดงผลใน ตารางที่ 4-2 พบว่าดินลูกรังชนิดนี้ มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.76 ซึ่งโดยทั่วไปดินลูกรังจะมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.7 ถึง 3.0 และค่าการดูดกลืนน้ำ เท่ากับ 1.83 ในขณะที่ดินลูกรังมีค่า L.L. เท่ากับร้อยละ 39 ค่า P.L. เท่ากับร้อยละ 33.33 และค่า P.I. เท่ากับร้อยละ 5.67 จากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าดินลูกรังที่นำมาทดสอบ มีค่าความสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวค่อนข้างสูง กล่าวคือหากมีการผสมน้ำในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ดินลูกรังชนิดนี้ไม่สามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรัง

Properties of aggregate	Specific gravity	Absorption (%)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plastic index (%)
Standard	2.7-3.0	1.5-2.0	< 50	N/A	< 6
lateritic soil	2.76	1.83	39.00	33.33	5.67

4.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษาเป็นทรายแม่น้ำ ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 ค้างตะแกรงมาตรฐาน 100 โดยมีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C33 (American Society for Testing and Materials, 2018b) ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง และค่าการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C128 (American Society for Testing and Materials, 2015) แสดงดังตารางที่ 4-3 โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.78 ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.62 และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.10 โดยมวลรวมละเอียด อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ก่อนผสม

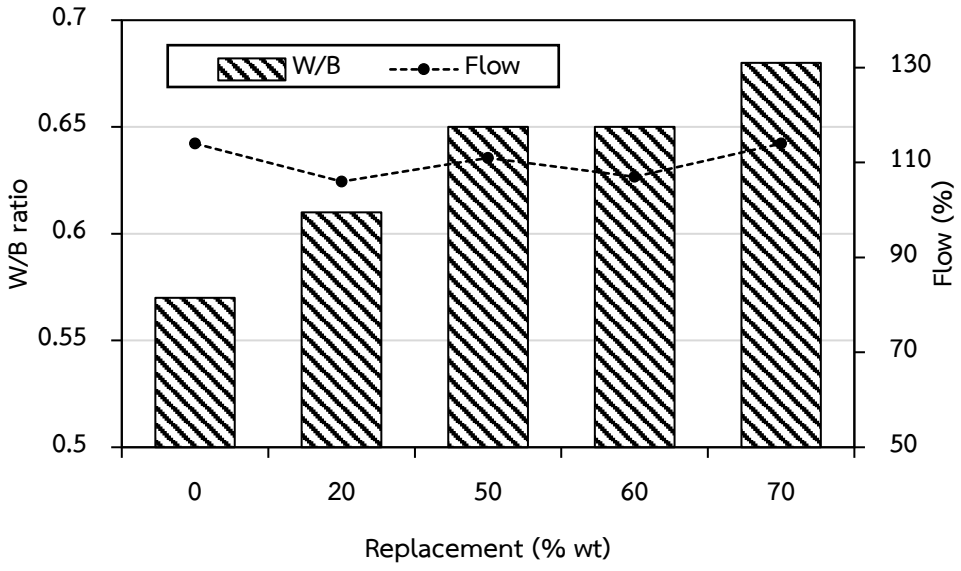
ตารางที่ 4-3 สมบัติจำเพาะของมวลรวมละเอียด

Properties	Fineness modulus	Specific gravity	Water absorption (%)
River Sand	2.78	2.62	1.10

4.2 ผลการทดสอบของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง

4.2.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ภาพที่ 4-4 แสดงความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในปริมาณที่มากขึ้น โดยมอร์ตาร์ควบคุม (CT) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.57 ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสม GPOFA อัตราส่วนร้อยละ 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่ในช่วง 110±5 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.61, 0.65, 0.65 และ 0.68 ตามลำดับ หรือใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่มีค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 4-4 เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีรูปร่างที่กลมสลับกับขรุขระ และมีความพรุนบางส่วน (Sata, Jaturapitakkul, and Rattanashotinunt, 2010; วิเชียร และชัย, 2554; ชัย และวีรชาติ, 2556; Tangchirapat and Jaturapitakkul, 2010; Kroehong, Sinsiri, Jaturapitakkul, and Chindaprasirt, 2011; Islam, Mo, Alengaram, and Jumaat, 2016) เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (50GPOFA และ 60GPOFA) เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า OPC ส่งผลให้ GPOFA มีพื้นที่ผิวมากกว่า OPC ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน เช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานที่เป็นเถ้าชีวมวลอื่น ๆ เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย (วิเชียร ชาลี และชัย, 2554; ชัย และวีรชาติ, 2556; Klathae et al., 2020; Klathae, Tran, Men, Jaturapitakkul, and Tangchirapat, 2021)



ภาพที่ 4-4 ผลของร้อยละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและการไหลแผ่

4.2.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CT, 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) ผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 15.1, 27.6, 31.5, 39.1 และ 47.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับมอร์ตาร์ควบคุมจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Rukzon and Chindaprasirt, 2008; Chusilp, Jaturapitakkul, and Kiattikomol, 2009; สำเริง, ปุณยวัจน, และ ปริญญา, 2564) เมื่อพิจารณาดัชนีกำลังของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ามอร์ตาร์ 20GPOFA มีค่าดัชนีกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 2888-2561 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2561) ระบุว่าดัชนีกำลังเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน จะต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 1 และไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 2 ของมอร์ตาร์ CT เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบปรากฏว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ 20GPOFA มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 81 และ 86 ของมอร์ตาร์ CT ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials, 2017)

สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) มีกำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น โดยที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน มอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.7 ถึง 21.4 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 11 ถึง 68 ของมอร์ตาร์ CT เนื่องจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีปริมาณของ OPC ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ GPOFA เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะต้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุ 1, 3 และ 7 วัน มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ CT ค่อนข้างมาก (Islam, Mo, Alengaram, and Jumaat, 2016; Men, Tangchirapat, Jaturapitakkul, and Ban, 2022) นอกจากนั้นเห็นได้ว่าเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ในช่วงมาตรฐาน ซึ่งส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าอัตราส่วน W/B สูงขึ้นเป็นส่งผลต่อการพัฒนาของกำลังอัด ต่อมาเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 และ 90 วัน มอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีกำลังอัดเท่ากับ 30.1, 23.9, และ 16.1 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 77, 61 และ 41 ของมอร์ตาร์ CT

ตามลำดับ และสามารถพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 37.5, 30.8 และ 23.9 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 79, 65 และ 50 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งได้ผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือ C-S-H จากการทำปฏิกิริยา โดย C-S-H มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน สามารถช่วยในการพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน ได้มากขึ้น นอกจากนี้การแทนที่ OPC ด้วย GPOFA (d_{50} =7.7 μm) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า OPC (d_{50} =18.1 μm) ถึง 2.35 เท่า มีส่วนในการช่วยให้เนื้อมอร์ตาร์มีความแน่นขึ้น เพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กของ GPOFA สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างช่องว่าง (Filler material) ของอนุภาคของเพสต์ และมวลรวมละเอียดได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 4-4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

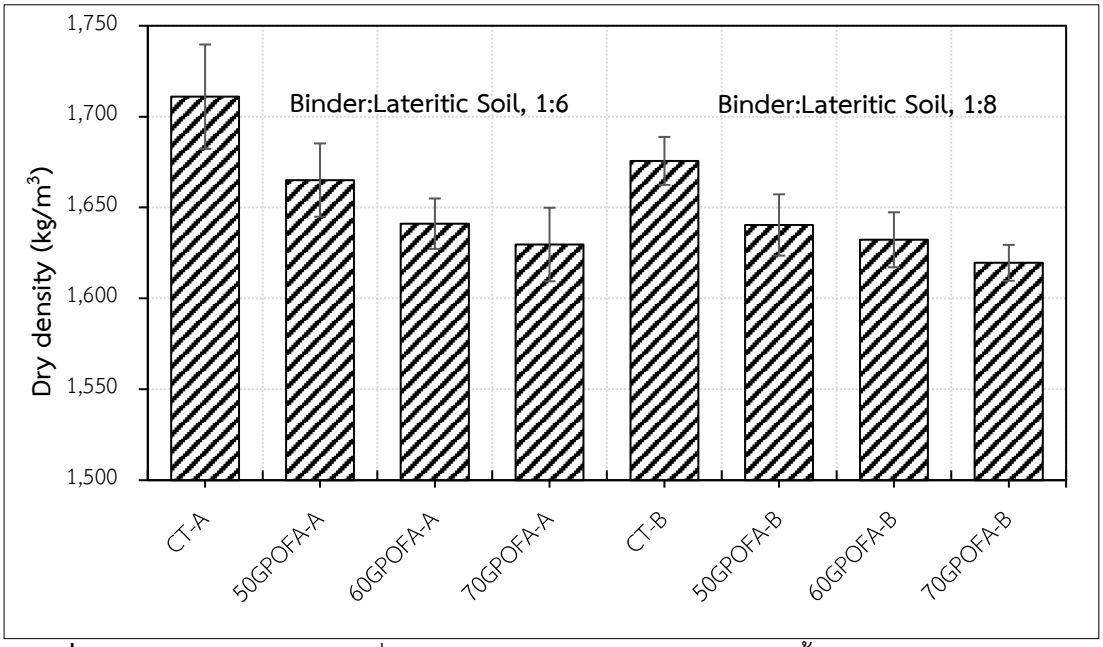
Sample	Compressive Strength (MPa) ***(Normalized compressive strength) (%)***				
	1 Day	3 Days	7 Days	28 Days	90 Days
CT	15.1***±0.71 (100)***	27.6***±0.48 (100)***	31.5***±0.27 (100)***	39.1***±0.16 (100)***	47.4***±0.51 (100)***
20GPOFA	10.4***±0.43 (69)***	19.9***±0.36 (72)***	25.6***±0.52 (81)***	33.4***±0.28 (86)***	43.7***±0.26 (92)***
50GPOFA	5.7***±0.22 (38)***	14.5***±0.15 (53)***	21.4***±1.49 (68)***	30.1***±0.52 (77)***	37.5±0.46***(79)***
60GPOFA	2.7***±0.08 (18)***	10.2***±0.65 (37)***	15.1***±0.10 (48)***	23.9***±0.14 (61)***	30.8***±0.18 (65)***
70GPOFA	1.7***±0.06 (11)***	7.1***±0.27 (26)***	9.1***±0.18 (29)***	16.1***±0.23 (41)***	23.9***±0.33 (50)***

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2561) และข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials, 2017) ซึ่งระบุดัชนีกำลัง (แทนที่ร้อยละ 20) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน จะต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ CT เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบปรากฏว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ 50GPOFA มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 68 และ 77 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ และสามารถพัฒนากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 79 ของมอร์ตาร์ CT ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่มีปริมาณ OPC เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น

4.3 ผลการทดสอบของอิฐบล็อกประสาน

4.3.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง

ภาพที่ 4-5 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย ที่อายุการบ่ม 28 วัน ของอิฐบล็อกประสานที่มีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าอิฐบล็อกประสานในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6, CT-A, 50GPOFA-A, 60GPOFA-A และ 70GPOFA-A มีค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 1,711, 1,665, 1,641 และ 1,630 kg/m^3 ตามลำดับ ในขณะที่อิฐบล็อกประสานในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8, CT-B, 50GPOFA-B, 60GPOFA-B และ 70GPOFA-B มีค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 1,676, 1,640, 1,632 และ 1,620 kg/m^3 ตามลำดับ

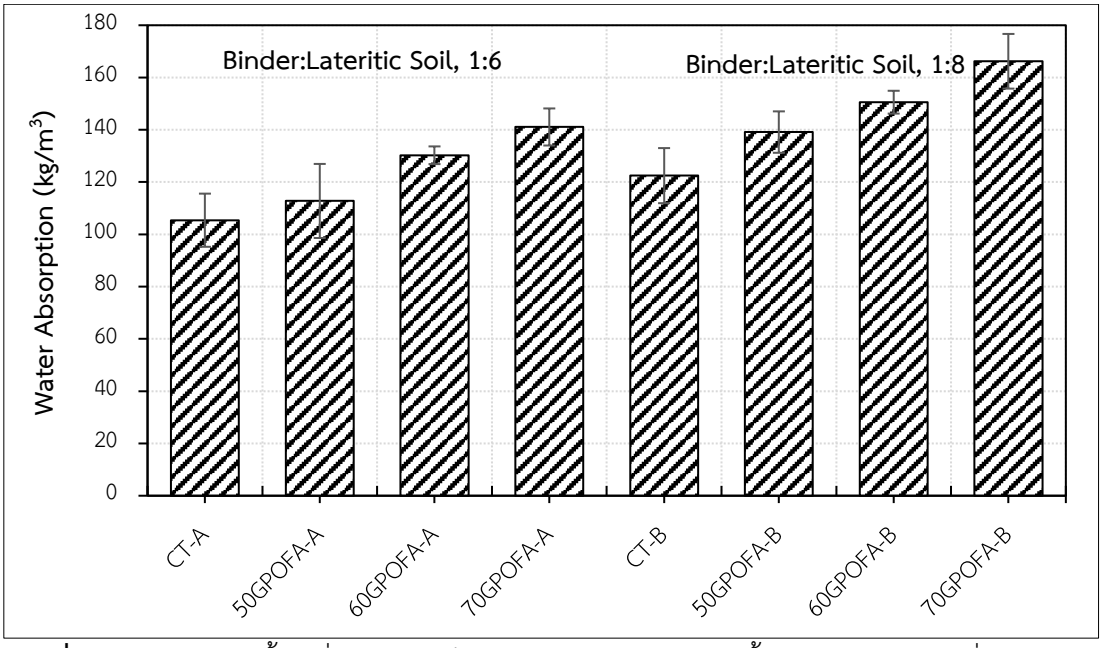


ภาพที่ 4-5 ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8

4.3.2 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง

ภาพที่ 4-6 แสดงผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำเฉลี่ย ที่อายุการบ่ม 28 วัน ของอิฐบล็อกประสานที่มีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าอิฐบล็อกประสานในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6, CT-A, 50GPOFA-A, 60GPOFA-A และ 70GPOFA-A เท่ากับ 105, 113, 130 และ 141 kg/m^{3}ตามลำดับ ในขณะที่อิฐบล็อกประสานในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8, CT-B,

50GPOFA-B, 60GPOFA-B และ 70GPOFA-B มีค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยเฉลี่ยเท่ากับ 122, 139, 151 และ 166 kg/m^3 ตามลำดับ

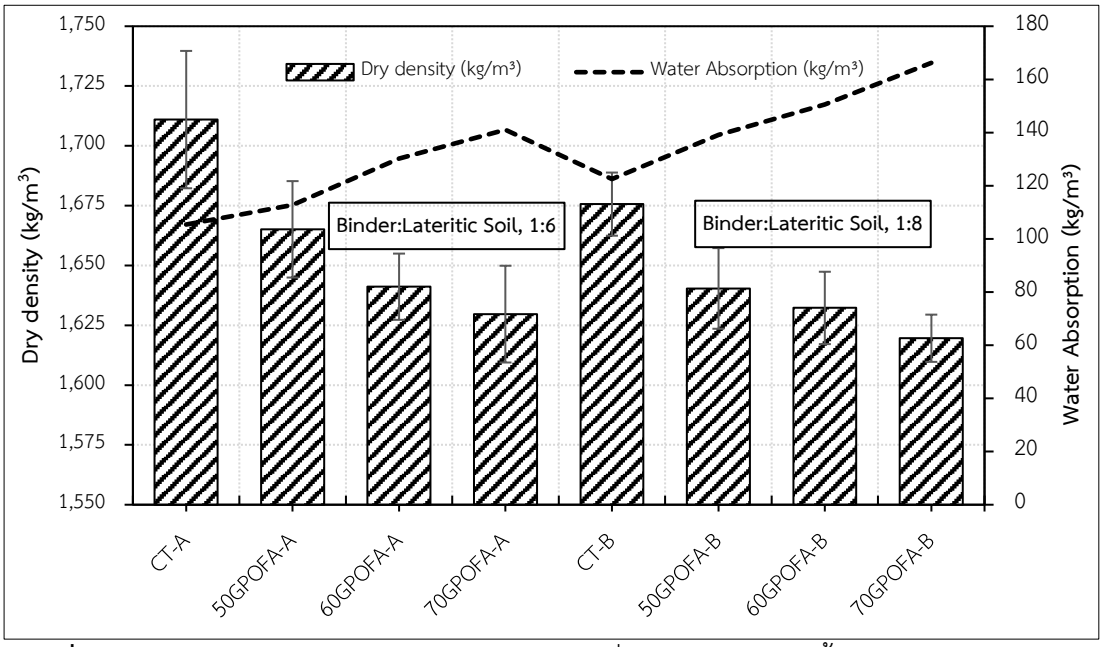


ภาพที่ 4-6 การดูดกลืนน้ำเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย และการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงให้เห็นว่าการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง และอัตราการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง และอัตราการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ที่ร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ กล่าวคือความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานจะแปรผกผันกับการดูดกลืนน้ำเฉลี่ย โดยเมื่ออิฐบล็อกประสานมีความหนาแน่นมากขึ้นจะส่งผลให้มีการดูดกลืนน้ำได้น้อยลง และเมื่อความหนาแน่นน้อยก็จะดูดกลืนน้ำได้มากขึ้น สาเหตุสำคัญของการลดลงของความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสาน มาจากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.65 ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.16 ดังนั้นเมื่อคิดที่เงื่อนไขการขึ้นเป็นรูปของบล็อก (Formation Conditions) ด้วยการ

แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานลดลง และมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการแทนที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ อีกทั้งเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีขนาดเล็ก และมีรูพรุนสูง ส่งผลให้มีการดูดกลืนน้ำที่มากกว่า นอกจากนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่เป็นวัสดุปอซโซลานนั้นมีปริมาณสูง ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ทำได้ยากกว่าอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว อีกทั้งสัดส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรังที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดช่องว่างของอิฐบล็อกประสานมากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ดีเมื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (602/2547) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) พบว่าการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงทั้งหมด เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด คือต้องมีค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยจากอิฐบล็อกประสานทั้ง 5 ก้อน ไม่มากกว่า 208-288 kg/m^3 ซึ่งอิฐบล็อกประสานที่มีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงทั้งหมดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ทั้งอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก

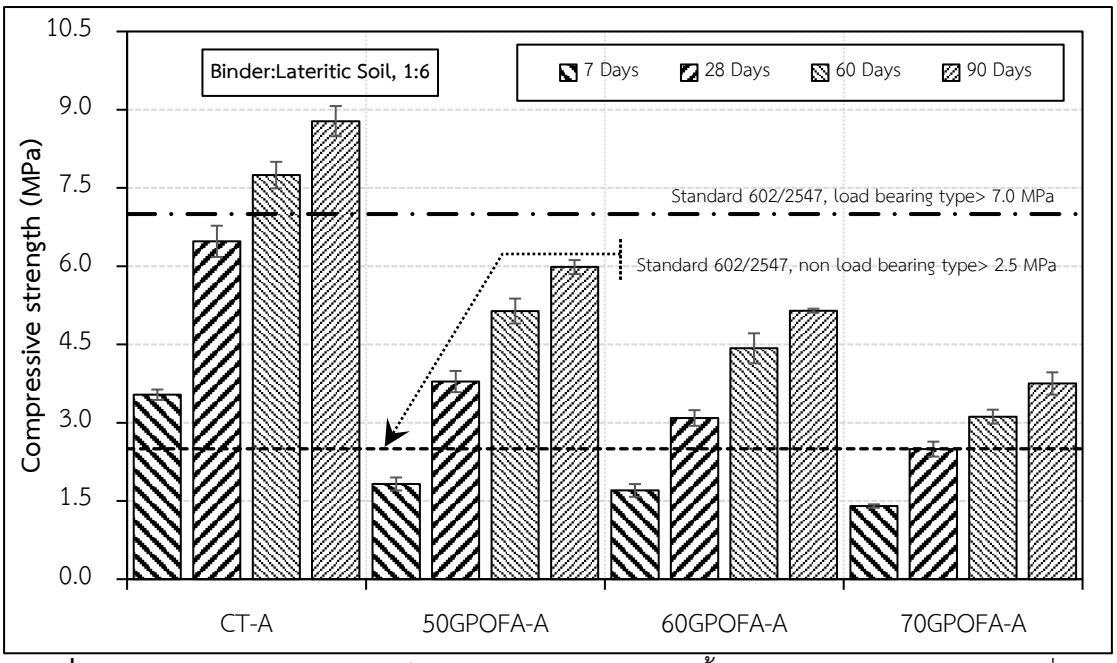


ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8

4.3.4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8

4.3.4.1 การทดสอบค่ากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6

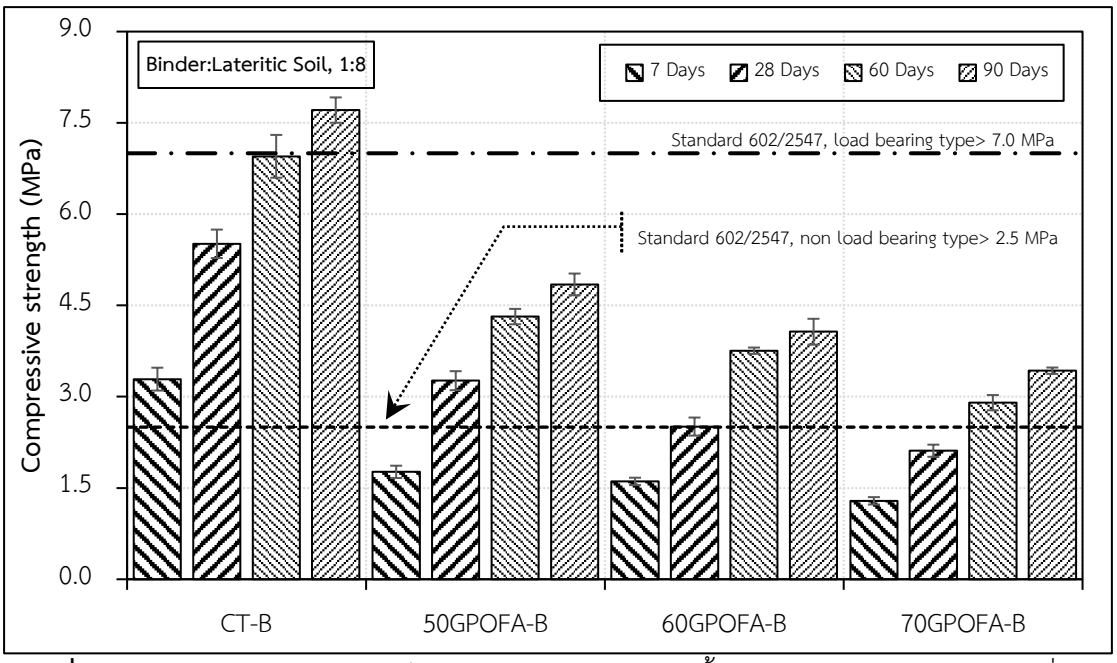
ภาพที่ 4-8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสาน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าอิฐบล็อกประสาน CT-A ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 3.5, 6.5, 7.7 และ 8.8 MPa ตามลำดับ ในขณะที่อิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 7 วัน อิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-A, 60GPOFA-A และ 70GPOFA-A มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 1.8, 1.7 และ 1.4 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 52, 48 และ 40 ของอิฐบล็อกประสาน CT-A ตามลำดับ ต่อมาที่อายุการบ่ม 28 วัน อิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-A, 60GPOFA-A และ 70GPOFA-A มีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 3.8, 3.1 และ 2.5 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 59, 48 และ 39 ของอิฐบล็อกประสาน CT-A ตามลำดับ ในช่วงปลายของการบ่มอิฐบล็อกประสานพบว่า ที่อายุการบ่ม 60 วัน อิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงสามารถพัฒนากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 5.1, 4.4 และ 3.1 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 66, 57 และ 40 ของอิฐบล็อกประสาน CT-A ตามลำดับ ต่อมาที่อายุการบ่ม 90 วัน อิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-A, 60GPOFA-A และ 70GPOFA-A มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 6.0, 5.1 และ 3.8 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 68, 59 และ 43 ของอิฐบล็อกประสาน CT-A ตามลำดับ



ภาพที่ 4-8 กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6

4.3.4.2 การทดสอบค่ากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8

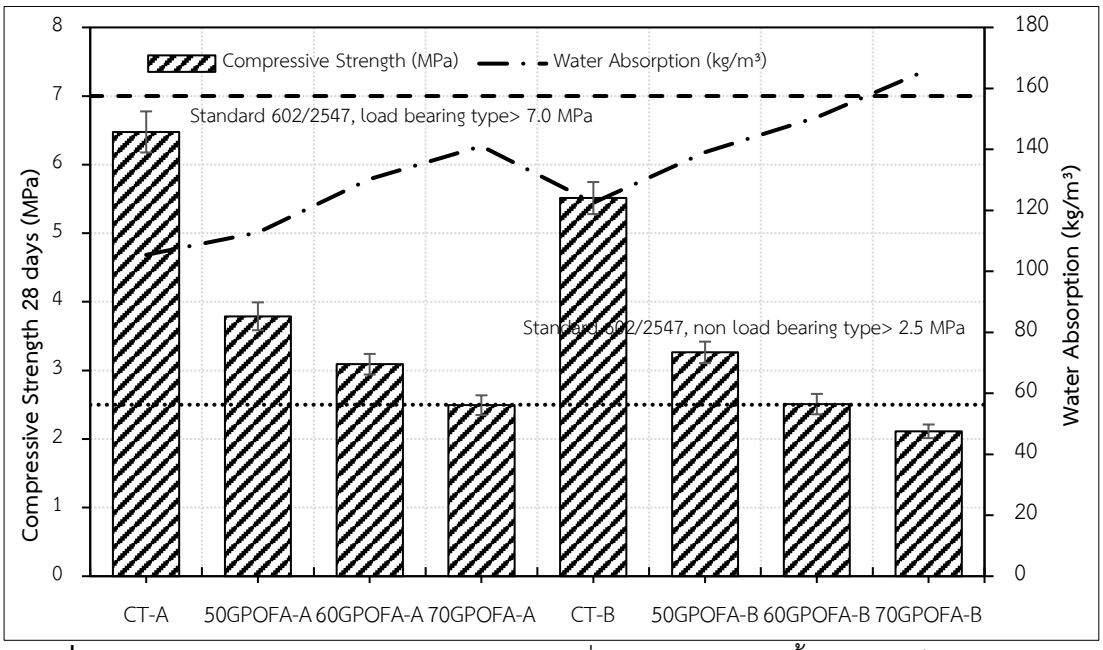
ภาพที่ 4-9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสาน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าอิฐบล็อกประสาน CT-B ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 3.3, 5.5, 6.9 และ 7.7 MPa ตามลำดับ ในขณะที่อิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 7 วัน อิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-B, 60GPOFA-B และ 70GPOFA-B มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 1.8, 1.6 และ 1.3 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 54, 49 และ 39 ของอิฐบล็อกประสาน CT- B ตามลำดับ ต่อมาที่อายุการบ่ม 28 วัน อิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-B, 60GPOFA-B และ 70GPOFA-B มีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 3.3, 2.5 และ 2.1 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 59, 46 และ 38 ของอิฐบล็อกประสาน CT-B ตามลำดับ ในช่วงปลายของการบ่มอิฐบล็อกประสานพบว่า ที่อายุการบ่ม 60 วัน อิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงสามารถพัฒนากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 4.3, 3.8 และ 2.9 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 62, 54 และ 42 ของอิฐบล็อกประสาน CT-B ตามลำดับ ต่อมาที่อายุการบ่ม 90 วัน อิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-B, 60GPOFA-B และ 70GPOFA-B มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 4.8, 4.1 และ 3.4 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 63, 53 และ 44 ของอิฐบล็อกประสาน CT-B ตามลำดับ



ภาพที่ 4-9 กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8

4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6, และ 1:8

ภาพที่ 4-10 แสดงค่ากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ที่ร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าอิฐบล็อกประสาน มีลักษณะการพัฒนาค่ากำลังอัดลดลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด โดยอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หรือ 50GPOFA-A, และ 50GPOFA-B มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ CT มากที่สุด โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 3.8 และ 3.3 MPa คิดเป็นร้อยละ 59 และ 59 ของอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ในขณะที่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน พบว่าเมื่ออิฐบล็อกประสานมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำลดลง เนื่องจากอิฐบล็อกประสานมีความหนาแน่นมากขึ้น เกิดโพรงและช่องว่างน้อยลง ซึ่งเมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานต้องสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 7.0 MPa สำหรับชนิดรับน้ำหนัก และสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 2.5 MPa สำหรับชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าอิฐบล็อกประสานซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด สามารถนำมาใช้ได้ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช. 602/2547 สำหรับชนิดไม่รับน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

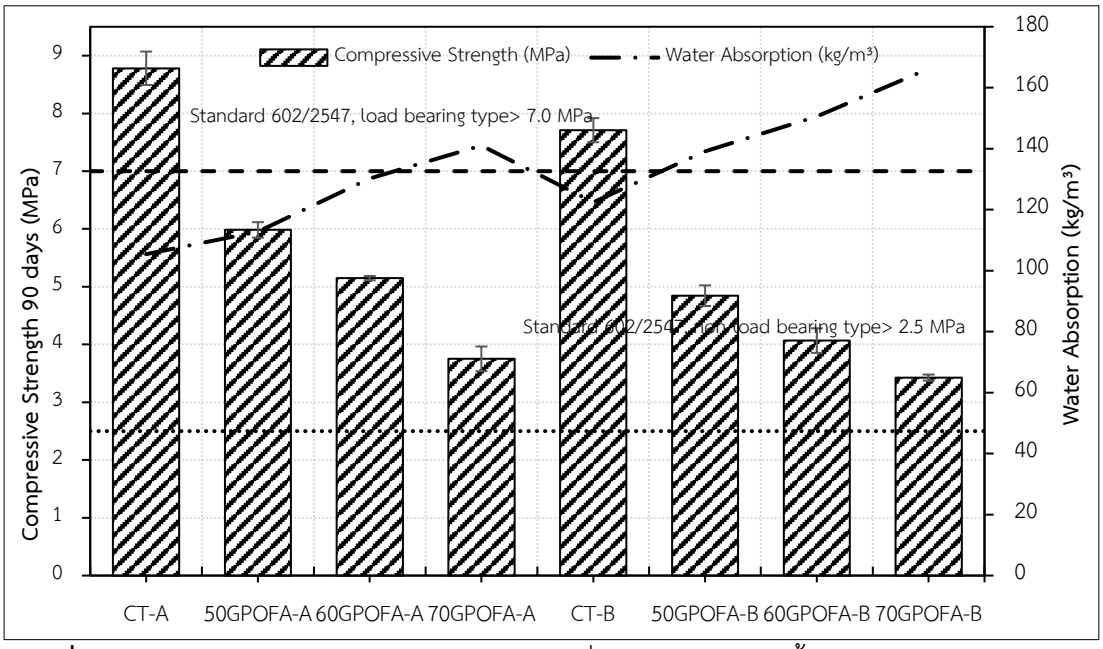


ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8

4.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6, และ 1:8

ภาพที่ 4-11 แสดงค่ากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ที่ร้อยละ 0, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าอิฐบล็อกประสาน มีลักษณะการพัฒนาค่ากำลังอัดลดลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด โดยอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หรือ 50GPOFA-A, และ 50GPOFA-B มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ CT มากที่สุด โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 6.0 และ 4.8 MPa คิดเป็นร้อยละ 68 และ 63 ของอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ในขณะที่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 90 วันและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน พบว่าเมื่ออิฐบล็อกประสานมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำลดลง เนื่องจากอิฐบล็อกประสานมีความหนาแน่นมากขึ้น เกิดโพรงและช่องว่างน้อยลง ซึ่งเมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 (สำนักงานมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานต้องสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 7.0 MPa สำหรับชนิดรับน้ำหนัก และสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 2.5 MPa สำหรับชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่อายุทดสอบ 90 วัน พบว่าอิฐบล็อกประสานซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด สามารถนำมาใช้ได้ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 สำหรับชนิดไม่รับน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)



ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ที่อายุการบ่ม 90 วัน ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:6 และ 1:8

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น ตามอายุการบ่มที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว จะให้กำลังรับแรงอัดมากกว่าอิฐบล็อกประสานที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูง (GPOFA) ในขณะที่เมื่อแทนที่ OPC ด้วย GPOFA มากขึ้น ก็จะยิ่งทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเป็นผลมาจากการแทนที่ GPOFA ในปริมาณสูงทำให้ปริมาณ OPC ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามไปด้วย ทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่หายไป (Chindaprasirt, Kroehong, Damrongwiriyanupap, Suriyo. and Jaturapitakkul, 2020; Klathae, Tran, Men, Jaturapitakkul, and Tangchirapat, 2021; ทวิช, Trinh Nhat Ho, Sambath, วีรชาติ และ ชัย, 2565; Men, Tangchirapat, Jaturapitakkul, and Ban, 2022) นอกจากนี้ลักษณะรูปร่างอนุภาคของ GPOFA ที่มีความพรุน และมีช่องว่างภายในทำให้ดูดซึมน้ำสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น และทำให้อิฐบล็อกประสานมีร้อยละของการดูดกลืนน้ำสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติลักษณะของอิฐบล็อกประสานชนิดนี้ก็มีการดูดกลืนน้ำในปริมาณสูงอยู่แล้ว (ธนธร, 2554; พงศ์ภูมิ, 2555; สำเร็จ, 2556)

4.4 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกประสาน

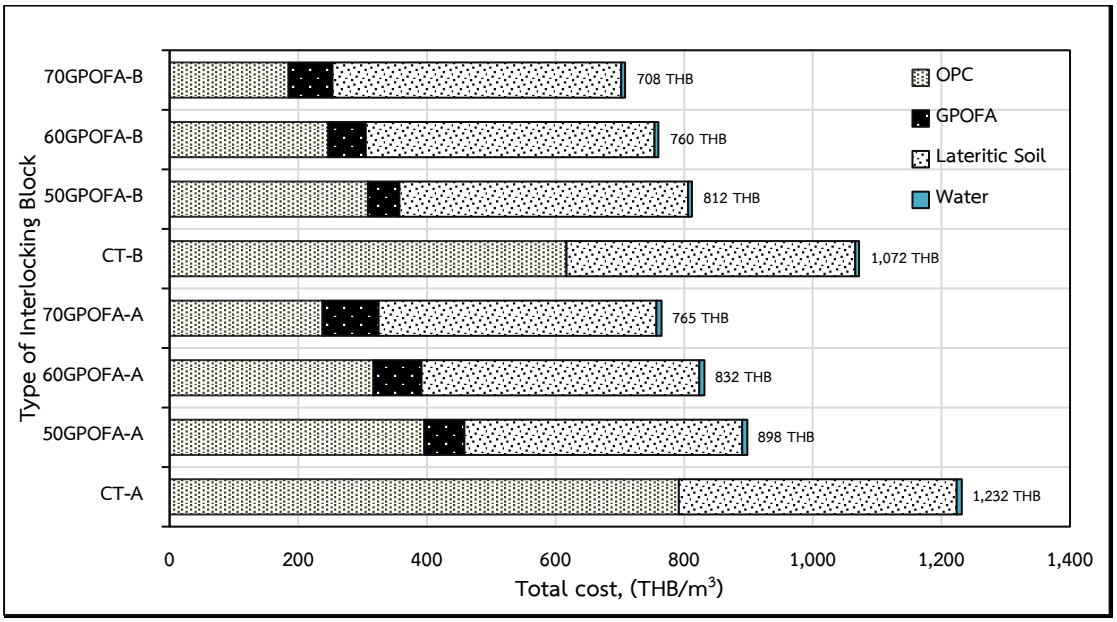
ตารางที่ 4-5 และ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบราคาอิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง 1 ลูกบาศก์เมตร โดยราคาวัสดุของการผลิตอิฐบล็อกประสาน 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เท่ากับ 3,300 บาท/ตัน (165 บาท ต่อปูนซีเมนต์ 1 กระสอบ) ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ซึ่งมีค่าการขนส่ง, ค่าแรงงานขนย้าย (ระยะทางไม่เกิน 200 กิโลเมตร) และค่าพลังงานในการบด ประมาณ 522 บาท/ตัน มวลรวมละเอียด (ดินลูกรัง) 300 บาท/ตัน และน้ำสะอาด 30 บาท/ตัน (1 USD=34.80 บาท) (Chindaprasirt, Kroehong, Damrongwiriyanupap, Suriyo. and Jaturapitakkul, 2020; Nisbet, VanGeem, Gajda, and Marceau, 2002) จากการประเมินราคา พบว่าอิฐบล็อกประสาน CT-A และ CT-B มีราคาเท่ากับ 1,232 และ 1,072 บาท/ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นราคาเท่ากับ 3.85 และ 3.35 บาท/ก้อน ตามลำดับ ในขณะที่อิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-A, 60GPOFA-A และ 70GPOFA-A มีราคาเท่ากับ 898, 832 และ 765 บาท/ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 27, 32 และ 38 ของอิฐบล็อกประสาน CT-A ตามลำดับ นอกจากนี้อิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ในอัตราส่วนวัสดุประสานต่อดินลูกรัง 1:8 โดยน้ำหนัก หรืออิฐบล็อกประสาน 50GPOFA-B, 60GPOFA-B และ 70GPOFA-B มีราคาเท่ากับ 898, 832 และ 765 บาท/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 24, 29 และ 34 ของอิฐบล็อกประสาน CT-B ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าราคารวมวัสดุของอิฐบล็อกประสานลดลงเมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 62-76 โดยอิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนราคาในการผลิตได้ประมาณร้อยละ 24-38 เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4-5 The economical of interlocking blocks 1:6

Interlocking block Symbols	Mixture proportions (Binder: lateritic soil, 1:6), [kg/m^3 ***(Baht/kg)***]				Baht/m^3	Baht/Block
	OPC	GPOFA	lateritic soil	Water		
CT-A	240 ***(3.30)***	-	1,440 ***(0.30)***	264 ***(0.03)***	1,232	3.85
50GPOFA-A	120 ***(3.30)***	120 ***(0.52)***	1,440 ***(0.30)***	264 ***(0.03)***	898	2.81
60GPOFA-A	96 ***(3.30)***	144 ***(0.52)***	1,440 ***(0.30)***	264 ***(0.03)***	832	2.60
70GPOFA-A	72 ***(3.30)***	168 ***(0.52)***	1,440 ***(0.30)***	264 ***(0.03)***	765	2.39

ตารางที่ 4-6 The economical of interlocking blocks 1:8

Interlocking block Symbols	Mixture proportions (Binder: lateritic soil, 1:6), [kg/m^3 ***(Baht/kg)***]				Baht/m^3	Baht/Block
	OPC	GPOFA	lateritic soil	Water		
CT-A	187 ***(3.30)***	-	1,496 ***(0.30)***	206 ***(0.03)***	1,072	3.35
50GPOFA-A	93.5 ***(3.30)***	93.5 ***(0.52)***	1,496 ***(0.30)***	206 ***(0.03)***	812	2.54
60GPOFA-A	74.8 ***(3.30)***	112.2 ***(0.52)***	1,496 ***(0.30)***	206 ***(0.03)***	760	2.38
70GPOFA-A	56.1 ***(3.30)***	130.9 ***(0.52)***	1,496 ***(0.30)***	206 ***(0.03)***	708	2.21



ภาพที่ 4-12 ราคาวัสดุของของการผลิตอิฐบล็อกประสาน

ตารางที่ 4-7, และ 4-8 แสดงการคำนวนระยะเวลาในการคืนทุนของการผลิตอิฐบล็อกประสาน พบว่าอิฐบล็อกประสานที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง (GPOFA) มีราคาประมาณ 2.21-2.81 บาทต่อก้อน โดยต้นทุนขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ และดินลูกรัง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับราคาอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่มีราคาประมาณ 3.35-3.85 บาทต่อก้อน ซึ่งมีราคาถูกกว่าร้อยละ 24-38 ซึ่งต้นทุนนี้ไม่รวมกับค่า-แรง และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ สำหรับกรณีการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ในขณะที่เมื่อทำการพิจารณาจุดคุ้มทุน และระยะเวลาในการคืนทุนของการผลิตอิฐบล็อกประสาน พบว่าอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวนั้น ต้องใช้ระยะเวลาในการคืนทุน ประมาณ 7.35-7.99 เดือน หรือ 221-240 วัน ในขณะที่อิฐบล็อกประสานที่มีการใช้ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีระยะเวลาในการคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ระหว่าง 5.91-6.67 เดือน หรือ 177-200 วัน เท่านั้น

ตารางที่ 4-7 Break-even point of interlocking blocks 1:6

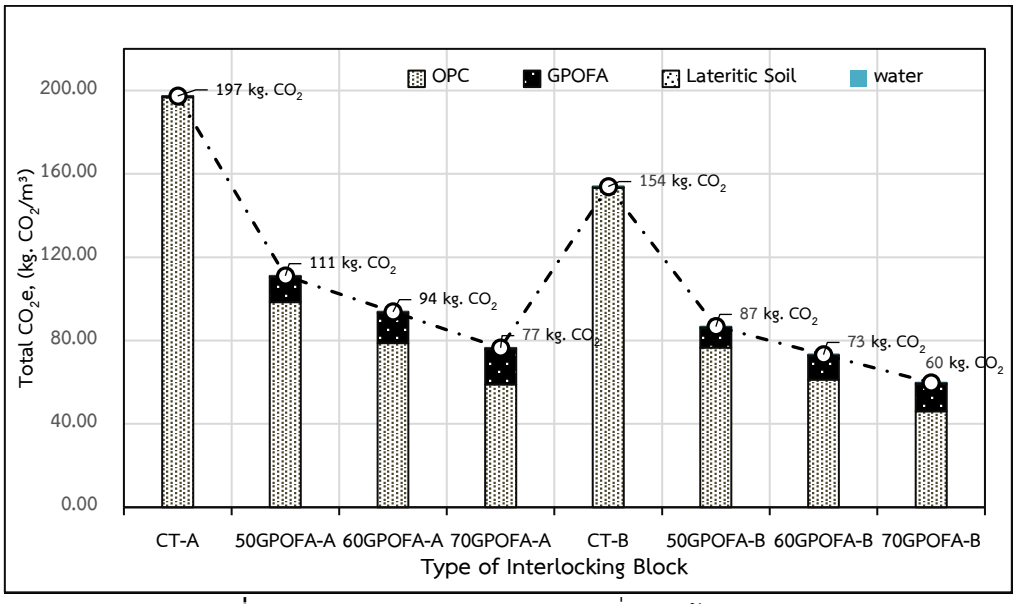
Specimen	CT-A	50GPOFA-A	60GPOFA-A	70GPOFA-A
Price Materials (Baht/Block)	3.85	2.81	2.60	2.39
Price Materials/Days (200 Block/Days) (Baht)	770	561	520	478
Price Materials/Years (20 Days/Month) (Baht)	184,788	134,748	124,740	114,732
Labor Cost /Years (400 Baht/2 Man/20 Days/Month) (Baht)	96,000			
Machine Cost (Baht)	22,000			
Summary Cost (Baht)	303,558	253,309	243,260	233,210
Sale Price/Block (Baht)	9.50			
Amount Block of return (Block)	31,953	26,664	25,606	24,548
Month of return (Month)	7.99	6.67	6.40	6.14

ตารางที่ 4-8 Break-even point of interlocking blocks 1:8

Specimen	CT-B	50GPOFA-B	60GPOFA-B	70GPOFA-B
Price Materials (Baht/Block)	3.35	2.54	2.38	2.21
Price Materials/Days (200 Block/Days) (Baht)	670	508	475	443
Price Materials/Years (20 Days/Month) (Baht)	160,812	121,823	114,025	106,227
Labor Cost /Years (400 Baht/2 Man/20 Days/Month) (Baht)	96,000			
Machine Cost (Baht)	22,000			
Summary Cost (Baht)	279,482	240,330	232,500	224,669
Sale Price/Block (Baht)	9.50			
Amount Block of return (Block)	29,419	25,298	24,474	23,649
Month of return (Month)	7.35	6.32	6.12	5.91

4.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอิฐบล็อกประสาน

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของอิฐบล็อกประสาน 1 ลูกบาศก์เมตร โดยปริมาณการปล่อย CO_2 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) มีปริมาณเท่ากับ 820.0 และ 100.6 kg. CO_2/ton ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนประกอบอื่น ๆ ได้แก่ มวลรวมละเอียด (ดินลูกรัง) และ น้ำ มีปริมาณการปล่อย CO_2 เท่ากับ 0.4 และ 0.1 kg. CO_2/ton ตามลำดับ (Nisbet, VanGeem, Gajda, and Marceau, 2002; Leeuwen, Kim, and Sriraman, 2016; Alnahhal et al., 2018; Huynh Ho, and Van Ho, 2022; Ho Huynh, 2022; Hong, Mohammed, Abdulkadir, and Liew, 2023) จากการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อย CO_2 ของแต่ละส่วนผสม พบว่าอิฐบล็อกประสาน CT-A และ CT-B มีปริมาณการปล่อย CO_2 เท่ากับ 197 และ 154 kg. CO_2/m^3 ตามลำดับ ในขณะที่อิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) มีปริมาณการปล่อย CO_2 อยู่ระหว่าง 77-111 และ 60-87 kg. CO_2/m^3 ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปริมาณการปล่อย CO_2 อิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ลดลงเมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้น โดยอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงสามารถลดปริมาณการปล่อย CO_2 ได้มากถึงร้อยละ 44-61 ของอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าหากมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง จะสามารถลดการปล่อย CO_2 ที่เกิดจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งปล่อย CO_2 สูงถึงร้อยละ 5-7 ของทั้งหมดที่ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลกให้มีปริมาณที่ลดลง



ภาพที่ 4-13 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของ 1 ม^3

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ในการผลิตอิฐบล็อกประสานทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งพิจารณาการดูดกลืนน้ำ กำลังรับแรงอัด การประเมินต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ชุมชน (602/2547) ตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังนี้

5.1 อิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น

5.2 อิฐบล็อกประสานจากเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด อัตราการแทนที่ร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วน 1:6 และอัตราการแทนที่ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในอัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด และการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน (602/2547) ชนิดไม่รับน้ำหนัก

5.3 อิฐบล็อกประสานที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีต้นทุนวัสดุในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ลดลงร้อยละ 24 ถึง 48

5.4 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ชนิดไม่รับน้ำหนัก ลดลงร้อยละ 44 ถึง 61 เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณาผลข้างต้นแล้วสามารถสรุปได้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด สามารถนำมาเป็นวัสดุในงานอิฐบล็อกประสานได้ เมื่อมีการใช้ในปริมาณที่เหมาะสม และมีการควบคุมปริมาณน้ำที่พอเหมาะ เนื่องจากอิฐบล็อกประสานมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานอิฐบล็อกประสาน ชนิดไม่รับน้ำหนักแบกทาน หรือนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในการผลิต

วัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ซึ่งนอกจากจะสามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยตรงแล้ว หากมีการส่งเสริมและให้ความรู้แก่ชุมชนที่มีวัสดุประเภทเถ้าปาล์มน้ำมัน อาจเป็นการสร้างรายได้ และอาชีพ รวมถึงการนำวัสดุที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มมาใช้ให้เกิดประโยชน์และสามารถใช้งานได้จริง ได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2555. **คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน**. กรุงเทพฯ.

จรูญ เจริญเนตรกุล. 2555. อิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมเถ้าและกะลาปาล์มน้ำมัน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2556. **การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ฐิติพงษ์ ชลธารกัมปนาท, ชูเกียรติ นิรา, พฤศจี จันทเขตร, ราตรี สีสมบัติ, สมชาญนัคร วรายุทธ, สินาด โกศลานันท์ และวรเชษฐ ป้อมเชียงพิณ. 2554. “การศึกษาอิทธิพลของซีเมนต์ที่มีผลต่อคุณสมบัติของอิฐบล็อกประสาน” ปริญญานิพนธ์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ณิชาดา ฉัตรสถาปัตยกุล, มณฑล วังเวียง, และภัทรา เพ่งธรรมกีรติ. 2555. ความเป็นไปได้ของการใช้กากตะกอนเคมีจากการผลิตน้ำประปาร่วมกับปูนซีเมนต์ในซีเมนต์มอร์ต้าและอิฐบล็อกประสาน. **Life Sciences and Environment Journal** 13(1): 48-54.

ทวิช กล้าแท้, Trinh Nhat Ho Tran, Sambath Men, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2565. ผลกระทบของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงต่อกำลังอัดโมดูลัสยืดหยุ่นและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูง. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.** 45(1): 43-57.

ธนธร เงินชูกลิ่น. 2554. การประยุกต์ใช้เถ้าแถลบในการผลิตบล็อกประสาน. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง. บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ปกป้อง รัตนชู. 2557. การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งนิคมบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส. **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์** 6(3): 61-69.

แผนธุรกิจอิฐบล็อกประสาน. 2550. โครงการบัณฑิตศึกษา. สาขา MBA. คณะพานิชยศาสตร์และการบัญชี. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. แหล่งที่มา: http://www. baanblockprasan.net /Design/Html/hardwary.html, 3 ธันวาคม 2559.

พงศ์ภูมิ ศรชมแก้ว. 2555. การผลิตอิฐบล็อกประสานจากกากอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตวิทยาลัยมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์สถาบันวิจัยและพัฒนา.

พนาทอง อินทรชัย. 2548. คุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและยิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วรากร ไม้เรียง, จิราพัฒน์ โชติไกร และประทีป ดวงเดือน. 2525. **ปฐพีกลศาสตร์: ทฤษฎีและปฏิบัติการ.** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

วิจัยกรุงศรี. 2563. **แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2563-65 อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม**. แหล่งที่มา: https://www.krungsri.com/getmedia /de09fc89-060d- 4545-ac441fe91709c640 /IO_Oil_Palm_200124_TH _EX.pdf. aspx, 1 กุมภาพันธ์ 2565.

วิเชียร ชาลี และชัย จาตุพิทักษ์กุล. 2554. ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.** 34(3): 203-213.

วุฒินัย กกกำแหง และนรา รัตนวงศ์, 2548. บล็อกประสานจากหน้าดินขาว, วิศวกรโยธา ฝ่ายถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชนบท. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

วุฒินัย กกกำแหง และพิชิต เจนบรรจง. 2552. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีอิฐบล็อกประสาน และการผลิตบล็อกประสานให้ได้คุณภาพ**. แหล่งที่มา: httm://www.technologyblockprasan.com, 4 ธันวาคม 2565.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2556. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีบล็อกประสาน**. แหล่งที่มา: http://technologyblockprasan.com, 3 ธันวาคม 2565.

สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ และ สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา. 2560. การใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นวัสดุปอตโซลานส่าหรับการปรับเสถียรและการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปอิฐบล็อกประสานส่าหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 25(26):1072-1082.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2561. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2888-2561 เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์**. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มผช. 602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน**. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำเร็จ สารมาคม. 2556. การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการผลิตบล็อกประสาน. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา, การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

สำเริง รักซ้อน, ปุณยวัจน วงษ์วสุวัต และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2564. กำลังอัด การดูดซึมน้ำและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**, 16(2): 28-37.

สุรเชษฐ์ ไชยพลฤทธิ์ และวิวรรธน์ จิตรแจ่ม. 2555. ศึกษาอิฐบล็อกประสานที่ใช่แร่ยิปซัมทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมโยธา. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

สุริยา การะเกษ. 2557. กำลังอัดของบล็อกประสานที่ผลิตจากปูนซีเมนต์และเปลือกหอยเชอรี่บด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

Alnahhal, M.F., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Abutaha, F., Alqedra, M.A. and Nayaka, R.R., 2018. Assessment on engineering properties and CO_2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement. **Journal of Cleaner production** 203: .822-835.

American Society for Testing and Materials. 2017. **ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia, United States.

American Society for Testing and Materials. 2018a. **ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement.** ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

American Society for Testing and Materials. 2007. **ASTM C1437 Standard test method for flow of hydraulic cement mortar**. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

American Society for Testing and Materials. 2013. **ASTM C109/C109M Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)**. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

American Society for Testing and Materials. 2015. **ASTM C128 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate**. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

American Society for Testing and Materials. 2018b. **ASTM C33 Standard specification for concrete aggregates**. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

Cheerarot, R., and Jaturapitakkul, C. 2004. A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. **Waste Management** 24(7): 701-709.

Chindaprasirt P, Homwuttiwong S, and Jaturapitakkul C. 2007. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk–bark ash. **Construction and Building Materials** 21(7): 1492-9.

Chindaprasirt, P., Kroehong, W., Damrongwiriyanupap, N., Suriyo, W. and Jaturapitakkul, C. 2020. Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash. **Journal of Building Engineering** 31: 101415.

Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K. 2009. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. **Construction and Building Materials** 23(12): 3523-3531.

Foo K, and Hameed B. 2009. Value-added utilization of oil palm ash: A superior recycling of the industrial agricultural waste. **Journal of Hazardous Materials** 172(2-3): 523-31.

Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C. and Roussel, N., 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. **Cement and Concrete Research** 40(5): 820-826.

Ho, L.S. and Huynh, T.P., 2022. Recycled waste medical glass as a fine aggregate replacement in low environmental impact concrete: Effects on long-term strength and durability performance. **Journal of Cleaner Production** 368: 133144.

Homwuttiwong, S., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2012. Permeability and abrasion resistance of concretes containing high volume fine fly ash and palm oil fuel ash. **Computers and Concrete** 10(4): 349-360.

Hong, W.C., Mohammed, B.S., Abdulkadir, I. and Liew, M.S., 2023. Modeling and Optimizing the Effect of Palm Oil Fuel Ash on the Properties of Engineered. **Cementitious Composite Buildings** 13(3): 628.

Huynh, T.P., Ho, L.S. and Van Ho, Q., 2022. Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag. **Construction and Building Materials** 347: 128512.

Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., and Chutubtim, S. 2001. A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. **Cement and Concrete Composites** 23(4-5): 335-343.

Klathae, T., Tanawuttiphong, N., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., Sukontasukkul, P. and Jaturapitakkul, C. 2020. Heat evolution, strengths, and drying shrinkage of concrete containing high volume ground bagasse ash with different LOIs. **Construction and Building Materials** 258: 119443.

Klathae, T., Tran, T. N. H., Men, S., Jaturapitakkul, C., & Tangchirapat, W. 2021. Strength, chloride resistance, and water permeability of high volume sugarcane bagasse ash high strength concrete incorporating limestone powder. **Construction and Building Materials** 311: 125326.

Kroehong W, Sinsiri T, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. 2011. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. **Construction and Building Materials**. 25(11): 4095-104.

Leeuwen, R.V., Kim Y.J. and Sriraman, V. 2016. The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete. **Journal of Civil Engineering Research** 6(4): 104-113.

Men, S., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., and Ban, C. C. 2022. Strength, fluid transport and microstructure of high-strength concrete incorporating high-volume ground palm oil fuel ash blended with fly ash and limestone powder. **Journal of Building Engineering** 56: 104714.

Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., Gajda, J. and Marceau, M. 2002 . **Environmental life cycle inventory of Portland cement concrete**. Available Source: http://www.vangeemconsulting.com/73_Environmental_Life_Cycle_Inverntory_SN_2137.pdf, December 20, 2022.

Pormmoon, P., Abdulmatin, A., Charoenwaiyachet, C., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul, C. 2021. Effect of cut-size particles on the pozzolanic property of bottom ash. **Journal of Materials Research and Technology** 10: 240-249.

Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. 2008. Strength and Chloride Penetration of Mortar with Mixture Proportioning in Ternary Cementitious System. **KMUTT Research and Development Journal**, 31(4): 659-869.

Safiuddin M, Abdus Salam M, and Jumaat MZ. 2011. Utilization of palm oil fuel ash in concrete: a review. **Journal of Civil Engineering and Management** 17(2): 234-47.

Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Rattanashotinunt, C. 2010. Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 22(10): 1033-1038.

Sinsiri, T., Kroehong, W., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2012. Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste. **Materials & Design** 42: 424-433.

Tangchirapat W, Saeting T, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K, and Siripanichgorn A. 2007. Use of waste ash from palm oil industry in concrete. **Waste Management** 27(1): 81-8.

Tangchirapat W, Tangpakasit J, Waew-kum S, and Jaturapitakkul C. 2003. A new pozzolanic material from palm oil fuel ash. **KMUTT Research and Development Journal** 26(4): 459-73.

Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul C. 2010. Strength, Drying Shrinkage, and Water Permeability of Concrete Incorporating Ground Palm Oil Fuel Ash. **Cement and Concrete Composites** 32(10): 767-774.

Ul Islam, M.M., Mo, K.H., Alengaram, U.J. and Jumaat, M.Z. 2016. Durability Properties of Sustainable Concrete Containing High Volume Palm Oil Waste Materials. **Journal of Cleaner Production** 137: 167-177.

ภาคผนวก ก

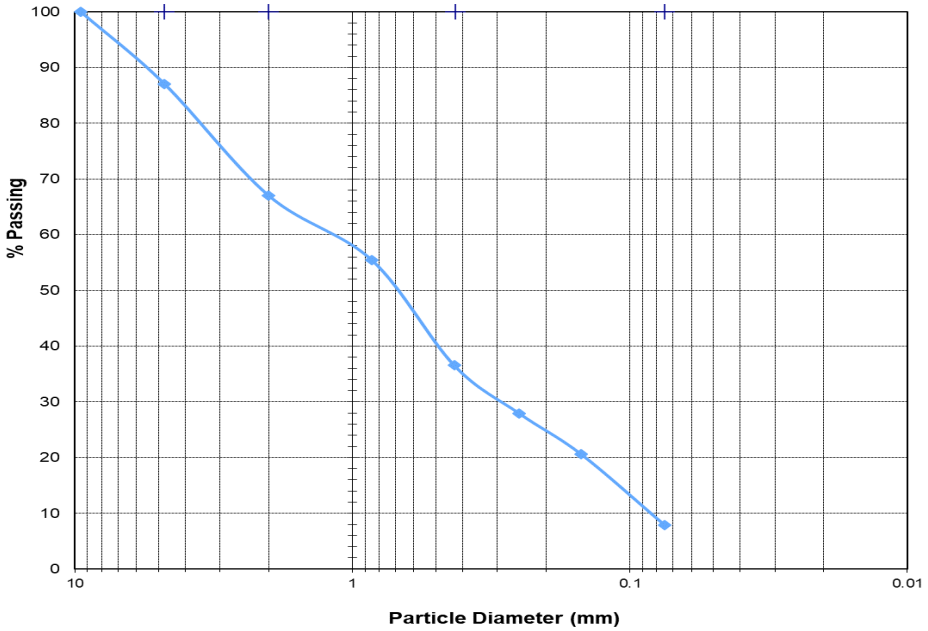
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสานและวัสดุผสม

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบหาความถ่วงจาเพาะของดินลูกรัง

SPECIFIC GRAVITY TEST			
TRIAL NO.	1	2	3
TEMPERTURE, (C)	29	30	27
FLASK + WATER, (g)	658.3	658.1	658.5
FLASK + WATER + SOIL, (g)	688.4	688.1	688.3
CONTAINER NO.	S1	S2	S3
DRY SOIL + CONTAINER, (g)	147.8	143.9	151.6
WT. OF CONTAINER, (g)	100.9	97	104.9
DRY SOIL, (g)	46.9	46.9	46.7
GT	0.996	0.9957	0.9965
G.S.	2.781	2.763	2.754
AVERAGEV G.S.	2.766		

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ขนาดคละของดินลูกรัง

SPECIFIC GRAVITY TEST			
TRIAL NO.	1	2	3
TEMPERTURE, (C)	29	30	27
FLASK + WATER, (g)	658.3	658.1	658.5
FLASK + WATER + SOIL, (g)	688.4	688.1	688.3
CONTAINER NO.	S1	S2	S3
DRY SOIL + CONTAINER, (g)	147.8	143.9	151.6
WT. OF CONTAINER, (g)	100.9	97	104.9
DRY SOIL, (g)	46.9	46.9	46.7
GT	1.00	1.00	1.00
G.S.	2.78	2.76	2.75
AVERAGEV G.S.	2.766		



ภาพที่ ก-1 ผลการทดสอบการหาขนาดของเม็ดดินลูกรัง

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

SPECIFIC GRAVITY TEST			
ตัวอย่างที่	1	2	3
ขีดระดับของเหลวเริ่มต้น (มล.)	0.3	0.32	0.29
อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันเบนซิน (C)	25	27	26
น้ำหนักน้ำมันก๊าดและภาชนะตอนเริ่มต้น (ก.)	311.5	311.3	310.5
ขีดระดับของเหลวสุดท้าย (มล.)	22	22.2	21.6
อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันเบนซิน (C)	25	27	26
น้ำหนักวัสดุและภาชนะสุดท้าย (ก.)	368.7	368.5	368
น้ำหนักวัสดุที่ใส่ ,Wc (ก.)	57.20	57.20	57.50
ปริมาตรที่ถูกแทนที่, Vc	21.70	21.88	21.31
ความถ่วงจำเพาะของวัสดุทดสอบ	2.64	2.61	2.70
ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจาเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด	2.65		

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังอัตราส่วน 1:6

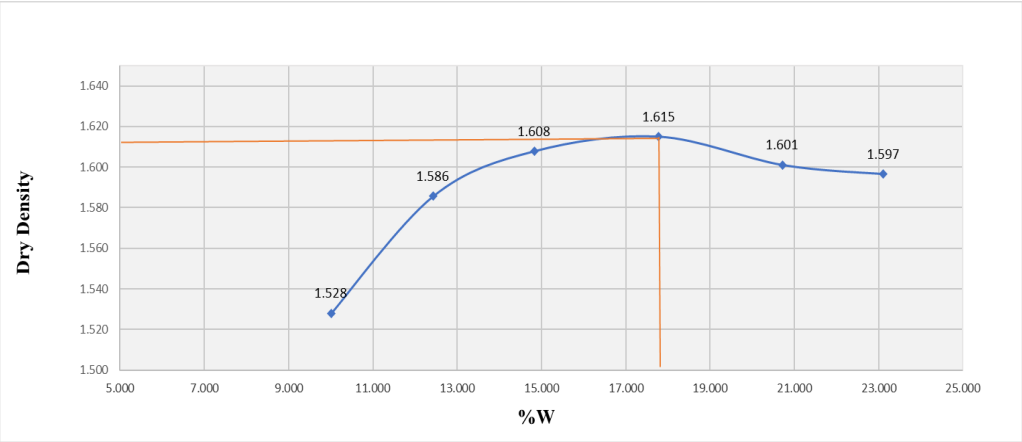
TYPE OF COMPACTION STANDARD PROCTOR VOLUME OF MOLD																		
WATER CONTENT DETERMINATION																		
TRIAL NO.	8%			11%			14%			17%			20%			23%		
WET SOIL+CAN (g)	36.4	34.7	29.7	28.9	31.7	30.8	40.0	40.7	40.2	42.3	44.5	42.3	57.9	51.4	41.3	51.0	49.0	51.1
DAY SOIL + CAN, (g)	34.3	33.1	28.3	27.2	29.6	29.1	37.2	38.3	37.1	38.3	41.8	37.9	51.3	46.3	38.0	45.6	43.0	45.4
WT. OF CAN, (g)	14.8	15.1	14.8	13.8	13.2	14.7	18.5	21.0	17.3	16.4	24.6	15.2	19.6	21.2	22.3	22.2	16.8	21.0
WT. OF WATER, (g)	2.1	1.6	1.4	1.7	2.1	1.7	2.8	2.4	3.1	4	2.7	4.4	6.6	5.1	3.3	5.4	6	5.7
WT. OF DRY SOIL, (g)	19.5	18	13.5	13.4	16.4	14.4	18.7	17.3	19.8	21.9	17.2	22.7	31.7	25.1	15.7	23.4	26.2	24.4
% WATER CONTENT	10.77	8.89	10.37	12.69	12.80	11.81	14.97	13.87	15.66	18.26	15.70	19.38	20.82	20.32	21.02	23.08	22.90	23.36
% WC AVERAGE	10.009			12.432			14.834			17.782			20.719			23.113		
DENSITY DETERMINASTION																		
WT. OF SOIL + MOLD (g)	5645			5738			5796			5847			5875			5905		
WT. OF MOLD (g)	4109			4109			4109			4109			4109			4109		
WT. OF SOIL IN MOLD (g)	1536			1629			1687			1738			1766			1796		
VOL MOLD	913.730			913.730			913.730			913.730			913.730			913.730		
WET DENSITY	1.681			1.783			1.846			1.902			1.933			1.966		
DRY DENSITY	1.528			1.586			1.608			1.615			1.601			1.597		

Optimum water co	17.782	%
Maximum dry dens	1.615	gm/cc

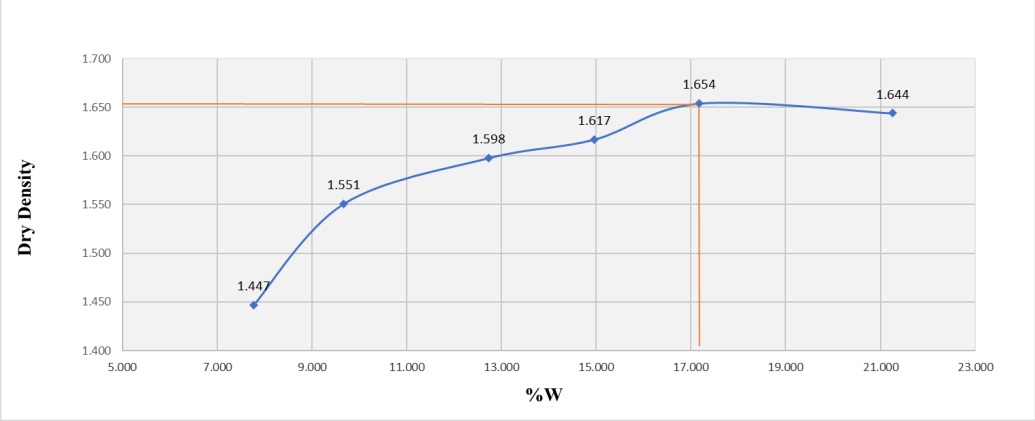
ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังอัตราส่วน 1:8

TYPE OF COMPACTION STANDARD PROCTOR VOLUME OF MOLD																		
WATER CONTENT DETERMINATION																		
TRIAL NO.	8%			11%			14%			17%			20%			25%		
WET SOIL+CAN (g)	40.1	29	39	37	46.5	41	38.2	31.7	27.5	32.1	42	34.3	18.1	16.3	18.8	18.3	16.1	20.8
DAY SOIL + CAN, (g)	38.5	27.8	37.5	35.7	44.2	38.8	36.3	29.5	25.7	29.5	38.2	31.5	16	14.6	16.8	15.9	14.1	17.9
WT. OF CAN, (g)	19.4	12.1	16.9	21.4	21	16.8	20.7	12.4	12	12.3	12.9	12.5	4.6	4.5	4.5	4.6	4.6	4.4
WT. OF WATER, (g)	1.6	1.2	1.5	1.3	2.3	2.2	1.9	2.2	1.8	2.6	3.8	2.8	2.1	1.7	2	2.4	2	2.9
WT. OF DRY SOIL, (g)	19.1	15.7	20.6	14.3	23.2	22	15.6	17.1	13.7	17.2	25.3	19	11.4	10.1	12.3	11.3	9.5	13.5
% WATER CONTENT	8.38	7.64	7.28	9.09	9.91	10.00	12.18	12.87	13.14	15.12	15.02	14.74	18.42	16.83	16.26	21.24	21.05	21.48
% WC AVERAGE	7.767			9.668			12.728			14.958			17.171			21.258		
DENSITY DETERMINASTION																		
WT. OF SOIL + MOLD (g)	5538			5668			5760			5813			5885			5936		
WT. OF MOLD (g)	4107			4107			4107			4107			4107			4107		
WT. OF SOIL IN MOLD (g)	1431			1561			1653			1706			1778			1829		
VOL MOLD	917.692			917.692			917.692			917.692			917.692			917.692		
WET DENSITY	1.559			1.701			1.801			1.859			1.937			1.993		
DRY DENSITY	1.447			1.551			1.598			1.617			1.654			1.644		

Optimum water content =	17.171	%
Maximum dry density =	1.654	gm/cc



ภาพที่ ก-2 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นของดินลูกรังอัตราส่วน 1:6



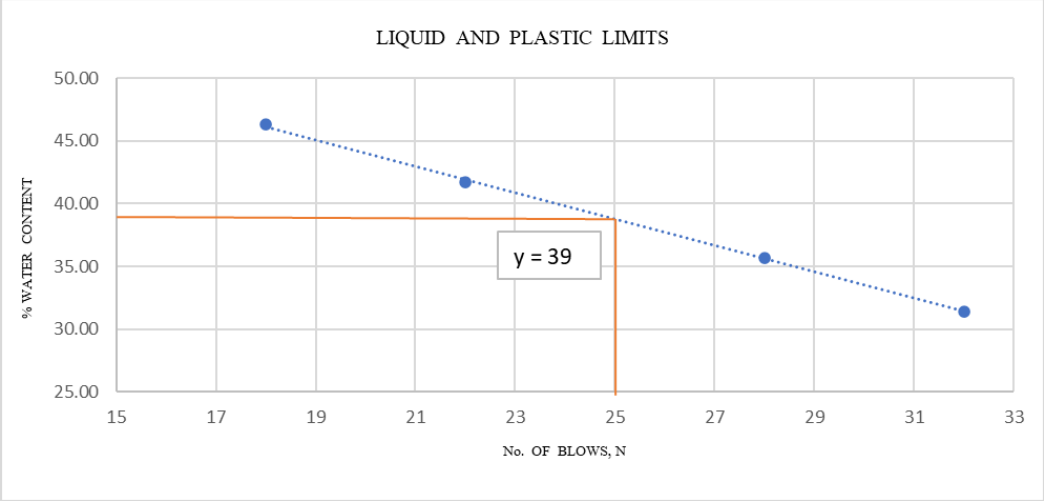
ภาพที่ ก-3 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นของดินลูกรังอัตราส่วน 1:8

ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบการหาพิกัดพลาสติก (Plastic Limits)

PLASTIC LIMIT TEST			
TRIAL NO.	1	2	3
CAN NO.	A1	A2	A3
WET SOIL + CAN, (g)	22.7	19.3	22.6
DAY SOIL + CAN, (g)	22.4	18.8	22
WT. OF CAN, (g)	21.5	17.3	20.2
WT. OF WATER, (g)	0.3	0.5	0.6
WT. OF DRY SOIL, (g)	0.9	1.5	1.8
%WATER CONTENT	33.33	33.33	33.33
AVERAGE	33.33		

ตารางที่ ก-7 ผลการทดสอบการหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limits)

LIQUID LIMIT TEST				
Determination No.	1	2	3	4
NO. OF BLOWS, (N)	32	28	22	18
CAN NO.	B1	B2	B3	B4
WET SOIL + CAN, (g)	25	26.6	15.9	32
DRY SOIL + CAN, (g)	23.9	24.6	14.9	29.5
WT. OF CAN, (g)	20.4	19	12.5	24.1
WT. OF WATER, (g)	1.1	2	1	2.5
WT. OF DRY SOIL, (g)	3.5	5.6	2.4	5.4
%WATER CONTENT	31.43	35.71	41.67	46.30



ภาพที่ ก-4 ผลการทดสอบการหาพิกัดข้นเหลว

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมอร์ตาร์ และอิฐบล็อกประสาน

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 0 (CT)

Age (day)	No.	Dimension (cm.)			Weight (kg)	Density (kg/m^3)	Load (kg)	Stress (ksc)	Stress (MPa)	Avg. (MPa)
		Width	Length	Height						
1	1	5.00	5.01	5.02	0.269	2137	3800	151.64	15.5	15.1
	2	5.01	5.02	5.05	0.269	2119	3860	153.42	15.6	
	3	5.10	5.01	5.01	0.268	2094	3590	140.50	14.3	
3	1	5.01	5.06	4.99	0.270	2131	6750	265.95	27.1	27.6
	2	5.02	5.00	5.01	0.270	2146	6910	275.30	28.1	
	3	5.01	5.06	5.04	0.269	2102	6840	269.60	27.5	
7	1	5.05	4.97	5.01	0.279	2213	7840	311.87	31.8	31.5
	2	5.04	5.06	5.02	0.272	2123	7830	306.67	31.3	
	3	5.04	4.97	5.01	0.267	2123	7730	308.23	31.4	
28	1	5.01	5.01	5.06	0.278	2185	9620	382.81	39.0	39.1
	2	5.01	5.02	5.03	0.272	2151	9680	384.73	39.2	
	3	5.04	5.01	5.03	0.273	2146	9650	381.72	38.9	
90	1	5.01	5.06	5.06	0.282	2197	11910	469.63	47.9	47.4
	2	5.03	5.04	5.02	0.279	2190	11840	466.67	47.6	
	3	5.08	5.06	5.01	0.284	2200	11840	459.89	46.9	

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 (20GPOFA)

Age (day)	No.	Dimension (cm.)			Weight (kg)	Density (kg/m^3)	Load (kg)	Stress (ksc)	Stress (MPa)	Avg. (MPa)
		Width	Length	Height						
1	1	5.04	4.99	5.09	0.266	2081	2690	107.05	10.9	10.4
	2	5.01	5.04	4.91	0.267	2154	2500	99.01	10.1	
	3	5.01	5.04	4.96	0.268	2135	2550	100.83	10.3	
3	1	5.01	5.01	5.01	0.269	2139	4990	198.68	20.3	19.9
	2	5.01	5.02	5.02	0.265	2101	4820	191.72	19.5	
	3	5.00	5.01	5.01	0.273	2175	4860	194.05	19.8	
7	1	5.03	5.00	5.06	0.273	2146	6160	245.13	25.0	25.6
	2	5.06	4.95	5.01	0.269	2141	6360	253.72	25.9	
	3	5.06	5.00	5.00	0.270	2136	6430	254.25	25.9	
28	1	4.98	5.02	5.01	0.269	2146	8250	330.01	33.6	33.4
	2	5.07	4.99	5.02	0.270	2126	8210	324.71	33.1	
	3	5.02	5.01	5.04	0.275	2169	8270	328.82	33.5	
90	1	5.04	5.02	5.02	0.278	2188	10840	428.11	43.6	43.7
	2	5.04	4.97	5.01	0.279	2219	10830	431.84	44.0	
	3	5.01	5.01	5.06	0.270	2122	10730	426.98	43.5	

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 50 (50GPOFA)

Age (day)	No.	Dimension (cm.)			Weight (kg)	Density (kg/m^3)	Load (kg)	Stress (ksc)	Stress (MPa)	Avg. (MPa)
		Width	Length	Height						
1	1	5.02	4.99	5.01	0.259	2064	1370	54.72	5.6	5.7
	2	5.00	5.01	5.01	0.259	2061	1470	58.62	6.0	
	3	5.02	5.00	5.02	0.259	2058	1380	55.07	5.6	
3	1	5.00	5.05	5.03	0.261	2055	3600	142.52	14.5	14.5
	2	5.00	4.98	5.03	0.263	2098	3560	142.97	14.6	
	3	5.03	5.01	5.03	0.262	2064	3540	140.31	14.3	
7	1	5.01	5.01	5.00	0.266	2119	5110	203.67	20.8	21.4
	2	5.01	5.04	5.02	0.265	2087	5740	227.14	23.2	
	3	5.03	5.00	5.05	0.264	2077	5040	200.32	20.4	
28	1	5.01	5.01	5.02	0.266	2110	7340	292.20	29.8	30.1
	2	5.04	5.01	5.07	0.275	2149	7380	292.39	29.8	
	3	5.02	5.01	5.01	0.260	2061	7580	301.15	30.7	
90	1	5.07	4.99	5.02	0.270	2126	9340	369.40	37.7	37.5
	2	5.04	5.06	5.04	0.275	2136	9270	363.06	37.0	
	3	5.04	5.06	5.02	0.272	2123	9490	371.68	37.9	

ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 60 (60GPOFA)

Age (day)	No.	Dimension (cm.)			Weight (kg)	Density (kg/m^3)	Load (kg)	Stress (ksc)	Stress (MPa)	Avg. (MPa)
		Width	Length	Height						
1	1	5.03	5.09	5.00	0.26	2041	680	26.56	2.7	2.7
	2	5.05	5.05	5.01	0.26	2031	670	26.23	2.7	
	3	5.02	5.03	5.01	0.27	2101	700	27.70	2.8	
3	1	5.01	5.03	5.06	0.26	2037	2350	93.22	9.5	10.2
	2	5.01	5.01	5.05	0.27	2088	2530	100.76	10.3	
	3	5.01	5.04	5.01	0.27	2095	2670	105.83	10.8	
7	1	5.04	5.02	5.01	0.27	2090	3740	147.65	15.1	15.1
	2	5.01	5.02	5.08	0.27	2080	3730	148.25	15.1	
	3	5.02	5.00	5.09	0.27	2078	3760	149.56	15.2	
28	1	5.01	5.00	5.03	0.27	2103	5840	233.04	23.8	23.9
	2	5.01	5.05	5.08	0.26	2045	5970	235.87	24.0	
	3	5.01	5.02	5.01	0.27	2117	5900	234.50	23.9	
90	1	5.03	5.00	5.05	0.274	2156	7650	304.05	31.0	30.8
	2	5.01	5.04	5.02	0.269	2120	7610	301.02	30.7	
	3	5.04	5.04	5.07	0.268	2083	7640	301.13	30.7	

.

ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ อัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 70 (70GPOFA)

Age (day)	No.	Dimension (cm.)			Weight (kg)	Density (kg/m^3)	Load (kg)	Stress (ksc)	Stress (MPa)	Avg. (MPa)
		Width	Length	Height						
1	1	5.03	5.01	5.03	0.26	2040	420	16.65	1.7	1.7
	2	5.01	5.03	5.03	0.26	2025	440	17.45	1.8	
	3	5.03	5.02	5.03	0.26	2032	410	16.24	1.7	
3	1	5.08	5.03	5.01	0.26	2051	1760	68.80	7.0	7.1
	2	5.01	5.06	5.06	0.26	2033	1830	72.16	7.4	
	3	5.03	5.04	5.02	0.26	2056	1700	67.00	6.8	
7	1	5.08	5.06	5.01	0.27	2099	2250	87.39	8.9	9.1
	2	5.06	5.08	5.00	0.26	2045	2340	90.93	9.3	
	3	5.03	5.03	5.01	0.26	2042	2270	89.68	9.1	
28	1	5.03	5.05	5.04	0.27	2091	3990	156.95	16.0	16.1
	2	5.01	5.06	5.02	0.27	2088	3980	156.87	16.0	
	3	5.05	5.13	5.08	0.27	2051	4170	160.84	16.4	
90	1	5.02	5.00	5.09	0.26	2062	5840	232.30	23.7	23.9
	2	5.01	5.00	5.03	0.28	2183	5970	238.23	24.3	
	3	5.01	5.05	5.08	0.27	2068	5900	233.10	23.8	

ตารางที่ ข-6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:6				Age of Interlocking Block 7 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-A	1	5.11	276.87	10.11	36.52	36.08	3.6	3.5
	2	5.09	279.88	10.33	36.91		3.6	
	3	5.04	277.62	9.83	35.41		3.5	
	4	5.19	276.87	10.23	36.95		3.6	
	5	5.08	278.62	9.65	34.63		3.4	
50GPOFA-A	1	5.15	278.62	5.00	17.95	19.09	1.8	1.8
	2	5.02	279.87	5.53	19.76		1.9	
	3	5.06	278.62	5.24	18.81		1.8	
	4	5.00	277.37	5.81	20.95		2.1	
	5	4.97	276.12	4.97	18.00		1.8	
60GPOFA-A	1	4.97	277.37	4.81	17.34	17.91	1.7	1.7
	2	5.09	278.61	4.86	17.44		1.7	
	3	5.07	276.11	5.56	20.14		2.0	
	4	5.13	277.37	4.86	17.52		1.7	
	5	4.95	278.61	4.77	17.12		1.7	
70GPOFA-A	1	4.96	277.37	3.98	14.35	14.31	1.4	1.4
	2	4.96	278.62	3.87	13.89		1.4	
	3	4.98	281.13	4.01	14.26		1.4	
	4	4.99	277.37	4.11	14.82		1.5	
	5	4.97	277.37	3.95	14.24		1.4	

ตารางที่ ข-7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 28วัน

Binder: Lateritic soil, 1:6				Age of Interlocking Block 28 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-A	1	5.07	274.63	18.86	68.68	66.09	6.7	6.5
	2	5.20	277.37	19.36	69.80		6.8	
	3	5.13	274.87	17.64	64.18		6.3	
	4	5.03	277.37	17.35	62.55		6.1	
	5	5.12	278.62	18.18	65.25		6.4	
50GPOFA-A	1	5.03	276.11	10.83	39.22	39.57	3.8	3.8
	2	5.10	279.87	10.76	38.45		3.8	
	3	5.00	278.62	10.65	38.22		3.7	
	4	5.17	274.87	11.88	43.22		4.2	
	5	4.99	277.37	10.75	38.76		3.8	
60GPOFA-A	1	5.03	278.62	9.05	32.48	31.53	3.2	3.1
	2	5.13	276.12	8.50	30.78		3.0	
	3	5.11	274.87	9.02	32.82		3.2	
	4	5.16	278.62	8.13	29.18		2.9	
	5	5.11	277.37	8.99	32.41		3.2	
70GPOFA-A	1	4.92	274.87	7.42	26.99	25.45	2.6	2.5
	2	5.06	278.61	6.62	23.76		2.3	
	3	4.97	276.11	6.88	24.92		2.4	
	4	4.94	277.37	7.48	26.97		2.6	
	5	4.99	274.87	6.76	24.59		2.4	

ตารางที่ ข-8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:6				Age of Interlocking Block 60 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-A	1	5.06	274.95	22.87	83.18	79.05	8.2	7.7
	2	5.18	277.69	21.12	76.06		7.5	
	3	5.11	275.47	21.57	78.30		7.7	
	4	5.01	277.69	22.00	79.21		7.8	
	5	5.11	278.32	21.85	78.52		7.7	
50GPOFA-A	1	5.00	277.57	14.53	52.35	52.45	5.1	5.1
	2	5.08	277.97	15.60	56.12		5.5	
	3	4.98	278.94	14.70	52.70		5.2	
	4	5.14	274.57	14.22	51.77		5.1	
	5	5.09	277.97	13.71	49.32		4.8	
60GPOFA-A	1	5.00	278.94	12.51	44.85	46.20	4.4	4.4
	2	5.10	275.20	13.85	50.33		4.9	
	3	5.07	275.75	13.16	47.72		4.7	
	4	5.00	278.94	12.68	45.46		4.5	
	5	5.07	277.69	11.84	42.64		4.2	
70GPOFA-A	1	4.88	275.75	8.51	30.86	31.80	3.0	3.1
	2	5.02	278.93	9.36	33.56		3.3	
	3	4.93	276.43	8.86	32.05		3.1	
	4	4.90	277.69	8.35	30.07		2.9	
	5	4.96	274.57	8.91	32.45		3.2	

ตารางที่ ข-9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:6				Age of Interlocking Block 90 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-A	1	5.02	276.12	25.75	93.26	89.60	9.1	8.8
	2	5.17	276.11	24.38	88.30		8.7	
	3	5.10	279.87	25.24	90.18		8.8	
	4	5.05	277.37	23.68	85.37		8.4	
	5	5.06	276.11	25.10	90.91		8.9	
50GPOFA-A	1	5.02	281.13	16.58	58.98	61.06	5.8	6.0
	2	5.00	277.37	16.87	60.82		6.0	
	3	4.95	278.62	17.36	62.31		6.1	
	4	5.02	277.37	16.89	60.89		6.0	
	5	4.96	274.87	17.12	62.28		6.1	
60GPOFA-A	1	5.00	281.13	14.92	53.07	52.54	5.2	5.1
	2	5.01	276.12	14.54	52.66		5.2	
	3	4.96	272.39	14.20	52.13		5.1	
	4	5.01	281.13	14.79	52.61		5.2	
	5	5.02	274.87	14.35	52.21		5.1	
70GPOFA-A	1	4.89	277.37	9.92	35.76	38.28	3.5	3.8
	2	4.99	279.87	11.37	40.63		4.0	
	3	4.94	276.11	10.24	37.09		3.6	
	4	4.92	277.37	10.38	37.42		3.7	
	5	4.93	277.37	11.24	40.52		4.0	

ตารางที่ ข-10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:8				Age of Interlocking Block 7 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-B	1	5.13	279.87	9.97	35.62	33.56	3.5	3.3
	2	5.15	278.62	9.53	34.20		3.4	
	3	5.21	278.59	8.73	31.34		3.1	
	4	5.18	278.62	9.72	34.89		3.4	
	5	5.00	277.37	8.80	31.73		3.1	
50GPOFA-B	1	5.07	277.37	4.80	17.31	18.01	1.7	1.8
	2	5.01	274.87	5.24	19.06		1.9	
	3	5.21	277.37	4.65	16.76		1.6	
	4	5.05	282.37	5.38	19.05		1.9	
	5	5.36	278.62	4.98	17.87		1.8	
60GPOFA-B	1	5.06	278.62	4.52	16.22	16.41	1.6	1.6
	2	5.08	279.87	4.47	15.97		1.6	
	3	4.87	278.59	4.82	17.30		1.7	
	4	5.03	277.37	4.38	15.79		1.5	
	5	5.15	277.37	4.65	16.76		1.6	
70GPOFA-B	1	4.88	279.87	3.51	12.54	13.15	1.2	1.3
	2	4.90	274.87	3.68	13.39		1.3	
	3	5.07	274.87	3.87	14.08		1.4	
	4	4.83	282.37	3.70	13.10		1.3	
	5	4.99	279.87	3.54	12.65		1.2	

ตารางที่ ข-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:8				Age of Interlocking Block 28 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-B	1	5.11	278.61	16.41	58.90	56.25	5.8	5.5
	2	5.14	277.35	14.66	52.86		5.2	
	3	5.09	278.62	16.09	57.75		5.7	
	4	5.04	276.11	15.68	56.79		5.6	
	5	5.02	278.62	15.31	54.95		5.4	
50GPOFA-B	1	4.95	278.62	8.92	32.01	33.30	3.1	3.3
	2	5.02	276.12	9.64	34.91		3.4	
	3	5.16	277.37	8.85	31.91		3.1	
	4	5.13	278.62	9.79	35.14		3.4	
	5	5.08	279.87	9.10	32.52		3.2	
60GPOFA-B	1	4.99	277.37	7.50	27.04	25.60	2.6	2.5
	2	5.02	278.62	7.29	26.16		2.6	
	3	4.98	273.63	7.34	26.82		2.6	
	4	4.92	274.87	6.67	24.27		2.4	
	5	5.06	279.87	6.64	23.73		2.3	
70GPOFA-B	1	4.95	281.13	6.47	23.01	21.56	2.3	2.1
	2	4.91	276.12	5.86	21.22		2.1	
	3	5.04	274.87	5.91	21.50		2.1	
	4	4.95	279.87	6.11	21.83		2.1	
	5	4.93	278.61	5.63	20.21		2.0	

ตารางที่ ข-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:8				Age of Interlocking Block 60 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-B	1	5.10	275.17	18.19	66.10	70.92	6.5	6.9
	2	5.12	279.87	20.45	73.07		7.2	
	3	5.18	278.23	20.92	75.19		7.4	
	4	5.15	281.43	19.32	68.65		6.7	
	5	5.03	277.37	19.85	71.58		7.0	
50GPOFA-B	1	5.04	278.25	12.66	45.50	44.05	4.5	4.3
	2	4.98	275.17	12.46	45.28		4.4	
	3	5.18	277.07	12.13	43.78		4.3	
	4	5.02	280.75	12.06	42.96		4.2	
	5	5.09	278.92	11.92	42.72		4.2	
60GPOFA-B	1	5.03	278.92	10.66	38.22	38.33	3.7	3.8
	2	5.05	280.47	10.76	38.36		3.8	
	3	5.04	279.47	10.63	38.04		3.7	
	4	5.00	277.07	10.86	39.20		3.8	
	5	4.98	277.67	10.50	37.81		3.7	
70GPOFA-B	1	4.85	277.67	8.05	28.99	29.61	2.8	2.9
	2	4.87	274.87	7.87	28.63		2.8	
	3	5.04	275.75	8.41	30.50		3.0	
	4	4.97	277.37	8.71	31.40		3.1	
	5	4.96	278.25	7.94	28.54		2.8	

ตารางที่ ข-13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:8				Age of Interlocking Block 90 days				
Symbols	Sample	Weight (kg)	Cross Sectional Area (cm^2)	Load (Ton)	Compressive Strength (ksc)		Compressive Strength (MPa)	
CT-B	1	5.05	277.41	21.61	77.90	78.67	7.6	7.7
	2	5.07	273.63	21.89	80.00		7.8	
	3	5.13	275.75	21.97	79.67		7.8	
	4	5.10	277.67	22.35	80.49		7.9	
	5	5.08	278.62	20.98	75.30		7.4	
50GPOFA-B	1	5.01	275.75	14.03	50.88	49.44	5.0	4.8
	2	5.03	275.17	13.52	49.13		4.8	
	3	4.99	274.57	13.72	49.97		4.9	
	4	5.04	278.25	14.13	50.78		5.0	
	5	5.04	278.92	12.95	46.43		4.6	
60GPOFA-B	1	5.00	277.67	11.13	40.08	41.51	3.9	4.1
	2	5.02	276.72	10.75	38.85		3.8	
	3	5.04	275.75	12.21	44.28		4.3	
	4	5.03	279.57	11.57	41.38		4.1	
	5	4.97	276.42	11.87	42.94		4.2	
70GPOFA-B	1	4.95	276.42	9.75	35.27	34.97	3.5	3.4
	2	4.96	278.62	9.55	34.28		3.4	
	3	5.01	280.75	9.74	34.69		3.4	
	4	4.94	277.37	9.69	34.94		3.4	
	5	4.93	279.50	9.97	35.67		3.5	

ตารางที่ ข-14 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุ 28 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:6				Age of Interlocking Block 28 days		
Symbols	Sample	Cross Sectional Area (m^2)	Thickness (m)	Weight (kg)	Unit weight of interlocking block (kg/m^3)	
CT-A	1	0.0302	0.100	5.16	1706.87	1710.98
	2	0.0305	0.100	5.20	1704.82	
	3	0.0304	0.101	5.22	1700.20	
	4	0.0305	0.101	5.18	1683.41	
	5	0.0292	0.101	5.19	1759.61	
50GPOFA-A	1	0.0302	0.101	5.11	1674.62	1665.11
	2	0.0307	0.101	5.17	1667.40	
	3	0.0306	0.102	5.06	1630.42	
	4	0.0305	0.101	5.14	1670.97	
	5	0.0301	0.101	5.11	1682.15	
60GPOFA-A	1	0.0304	0.100	5.02	1649.96	1641.12
	2	0.0302	0.101	5.05	1654.26	
	3	0.0306	0.100	5.04	1646.34	
	4	0.0308	0.101	5.04	1619.81	
	5	0.0303	0.102	5.04	1635.25	
70GPOFA-A	1	0.0302	0.100	4.99	1653.02	1629.67
	2	0.0306	0.101	4.97	1605.46	
	3	0.0306	0.100	4.93	1612.75	
	4	0.0303	0.100	4.98	1644.07	
	5	0.0304	0.100	4.96	1633.03	

ตารางที่ ข-15 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุ 28 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:8				Age of Interlocking Block 28 days		
Symbols	Sample	Cross Sectional Area (m^2)	Thickness (m)	Weight (kg)	Unit weight of interlocking block (kg/m^3)	
CT-B	1	0.0302	0.101	5.17	1690.54	1675.64
	2	0.0308	0.100	5.15	1674.67	
	3	0.0304	0.102	5.11	1658.42	
	4	0.0303	0.102	5.16	1668.04	
	5	0.0305	0.100	5.14	1686.55	
50GPOFA-B	1	0.0305	0.099	5.04	1668.86	1640.41
	2	0.0307	0.100	5.01	1632.24	
	3	0.0307	0.101	5.04	1625.03	
	4	0.0307	0.100	5.02	1635.50	
	5	0.0303	0.101	5.03	1640.41	
60GPOFA-B	1	0.0307	0.098	4.98	1657.93	1632.26
	2	0.0302	0.101	4.95	1623.49	
	3	0.0304	0.100	4.96	1633.60	
	4	0.0307	0.100	4.97	1620.88	
	5	0.0302	0.101	4.97	1625.40	
70GPOFA-B	1	0.0304	0.101	4.96	1613.45	1619.58
	2	0.0304	0.100	4.97	1635.58	
	3	0.0308	0.099	4.94	1620.68	
	4	0.0305	0.101	4.96	1609.91	
	5	0.0306	0.100	4.96	1618.29	

ตารางที่ ข-16 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:6 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:6				Age of Interlocking Block 28 days			
Symbols	Sample	Weight (kg)	Weight Wet (kg)	Net Weight (kg.)	Water absorption (%)	Water absorption (kg./m³)	
CT-A	1	5.16	5.53	0.37	6.70	121.19	105.41
	2	5.20	5.50	0.29	5.36	95.69	
	3	5.22	5.52	0.30	5.44	97.28	
	4	5.18	5.51	0.33	6.03	107.45	
	5	5.19	5.51	0.32	5.83	105.43	
50GPOFA-A	1	5.11	5.39	0.28	5.17	92.42	112.78
	2	5.17	5.54	0.37	6.74	121.76	
	3	5.06	5.46	0.40	7.33	128.98	
	4	5.14	5.47	0.33	5.97	106.25	
	5	5.11	5.46	0.35	6.42	114.46	
60GPOFA-A	1	5.02	5.42	0.40	7.45	134.45	130.27
	2	5.05	5.43	0.38	7.06	125.83	
	3	5.04	5.44	0.40	7.40	132.60	
	4	5.04	5.43	0.39	7.26	128.54	
	5	5.04	5.43	0.40	7.30	129.91	
70GPOFA-A	1	4.99	5.44	0.45	8.33	147.58	141.08
	2	4.97	5.36	0.40	7.40	130.74	
	3	4.93	5.38	0.45	8.37	147.56	
	4	4.98	5.40	0.43	7.87	137.97	
	5	4.96	5.39	0.43	8.04	141.56	

ตารางที่ ข-17 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน อัตราส่วน 1:8 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

Binder: Lateritic soil, 1:8				Age of Interlocking Block 28 days			
Symbols	Sample	Weight (kg)	Weight Wet (kg)	Net Weight (kg.)	Water absorption (%)	Water absorption (kg./m³)	
CT-B	1	5.17	5.58	0.412	7.38	134.69	122.47
	2	5.15	5.50	0.343	6.25	111.59	
	3	5.11	5.46	0.347	6.36	112.65	
	4	5.16	5.54	0.377	6.82	122.03	
	5	5.14	5.54	0.401	7.23	131.38	
50GPOFA-B	1	5.04	5.49	0.453	8.25	150.08	139.13
	2	5.01	5.43	0.420	7.74	136.88	
	3	5.04	5.44	0.398	7.32	128.34	
	4	5.02	5.46	0.436	8.00	142.13	
	5	5.03	5.45	0.424	7.77	138.21	
60GPOFA-B	1	4.98	5.42	0.438	8.08	145.71	150.57
	2	4.95	5.42	0.465	8.59	152.52	
	3	4.96	5.44	0.476	8.76	156.77	
	4	4.97	5.42	0.452	8.33	147.35	
	5	4.97	5.43	0.460	8.47	150.50	
70GPOFA-B	1	4.96	5.51	0.552	10.01	179.54	166.22
	2	4.97	5.43	0.458	8.44	150.84	
	3	4.94	5.46	0.520	9.52	170.43	
	4	4.96	5.47	0.505	9.23	163.80	
	5	4.96	5.47	0.510	9.33	166.49	

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่จากโครงการวิจัย

กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง

Compressive Strength of Cement Mortar Containing High Volume Palm Oil Fuel Ash

นภดล ศรภักดี[1] ทวิช กล้าแท้[2,*] ชูเกียรติ ชูสกุล[3] สุพร ฤทธิภักดี[4] ประชุม คำพุฒ[5] และ เชาฟีร์ ดือราแม[6]

[1, 2, 3, 4] *สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ*
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ. นครศรีธรรมราช
[5]*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี*
[6]*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร*
*Corresponding author; E-mail address: tawich.k@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ในปริมาณสูง ที่มีต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) มาบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร แทนที่ OPC ที่ร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (CT, 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจากค่าปริมาณน้ำซึ่งทำให้เกิดค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110±5 ผลการทดสอบพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 33.4, 30.1, 23.9 และ 16.1 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 86, 77, 61 และ 41 ของ CT ตามลำดับ สำหรับการประเมินต้นทุนการผลิต พบว่า ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ OPC ด้วย GPOFA มีต้นทุนวัสดุลดลงร้อยละ 12 ถึง 42 ในขณะที่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 16 ถึง 56 เมื่อเทียบกับ CT จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า GPOFA เป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ OPC ได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อผลิตเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ด้วย

คำสำคัญ: ซีเมนต์มอร์ตาร์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, ปริมาณสูง, วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

This research aimed to investigate the effect of ground palm oil fuel ash (GPOFA) as high-volume cementitious material replacement on compressive strength of cement mortar. Palm oil fuel ash from factory (OPOFA) was ground until its median particle size (d_{50}) was 7.7 microns. GPOFA was then used to replace ordinary Portland cement (OPC) at 0, 20, 50, 60 and 70 wt% of binder (CT, 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA and 70GPOFA). The water-to-binder ratios were determine to achieve a flow valued of 110±5%. The results indicated that the 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA and 70GPOFA mortar had the compressive strengths at 28 days of 33.4, 30.1, 23.9 and 16.1 MPa or 86, 77, 61 and 41% of CT, respectively. In terms of the production cost, GPOFA cement mortar resulted in a reduction the material cost by 12–42%. However, environmental issues of 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA and 70GPOFA mortar showed a decrease in carbon dioxide emission of 16–56% as compared to CT mixture. Furthermore, GPOFA could be used as a good pozzolanic material to replace OPC by up to 50 wt% of binder for the production of eco–friendly materials as well as cost saving.

Keywords: Cement Mortar, Eco–friendly Materials, High Volume, Palm Oil Fuel Ash

1. คำนำ

อุตสาหกรรมพื้นฐาน เช่น ปูนซีเมนต์ เป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีปริมาณการใช้สูงในตลาดวัสดุก่อสร้าง และมีแนวโน้มขยายตัวตามสภาวะทางเศรษฐกิจ อันมีปัจจัยขับเคลื่อนมาจากการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ของภาครัฐ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงการเมกะโปรเจกต์ที่มีการก่อสร้างต่อเนื่อง และก่อสร้างโครงการใหม่ รวมถึงการลงทุนก่อสร้างภาคเอกชนทั้งโครงการที่อยู่อาศัยและอสังหาริมทรัพย์เพื่อการพาณิชย์ [1-2] ในปี 2022 ปริมาณการบริโภคปูนซีเมนต์ในประเทศไทยอยู่ในระดับ 35.1 ล้านตัน และการส่งออกปูนซีเมนต์และปูนเม็ด มีแนวโน้มอยู่ที่ 12.4 ล้านตัน ตามการฟื้นตัวของเศรษฐกิจของประเทศคู่ค้าหลัก ได้แก่ กัมพูชา บังกลาเทศ ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา [3] สำหรับในมิติด้านพลังงานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานในปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งใช้พลังงานความร้อนถึง 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ในการผลิตปูนเม็ด

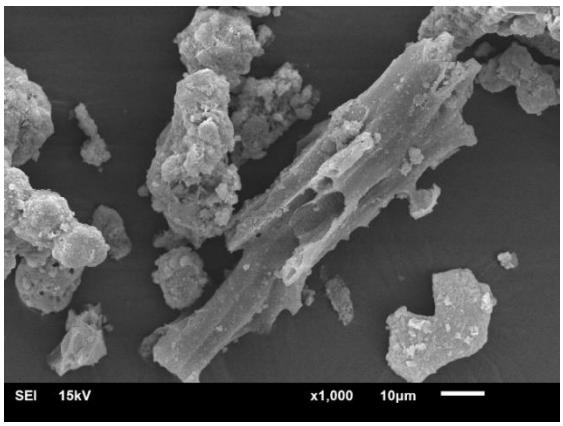
และการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่ง ซึ่งทุก ๆ 1 ตันของการผลิตปูนซีเมนต์คาดว่ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่บรรยากาศราว ๆ 1 ตัน โดยปริมาณก๊าซ CO_2 จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์คิดเป็นร้อยละ 5-7 ของทั้งหมดที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก เป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบเป็นวงกว้างแทบจะทุกพื้นที่ทั่วโลก [4-5] ในประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อใช้ในงานคอนกรีต หรือผลิตวัสดุก่อสร้างอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซิลิกาฟูม เถ้าปาล์มน้ำมัน หรือเถ้าชานอ้อย เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ [6-10] จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ดี หากมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ โดยการบดให้มีความละเอียดมากขึ้น หรือมีการแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561, 2562) [11] โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถเพิ่มสมบัติที่ดีด้านความคงทนของคอนกรีต เช่น Sata และคณะ [7] ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ในอัตราร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดความร้อนภายในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ Tangchirapat และ Jaturapitakkul [12] ได้ศึกษาการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันมีส่วนช่วยในการลดการซึมผ่านน้ำได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ต่อมา Kroehong และคณะ [13] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ผลการทดสอบพบว่า ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าการเติมเต็มช่องว่างของอนุภาควัสดุ (Filler Effect)

แม้ว่าปัจจุบันจะมีงานวิจัยการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แต่งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นเพียงงานวิจัยที่พิจารณาถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อีกทั้งการใช้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตยังไม่แพร่หลายมากนัก ต่างจากการใช้เถ้าถ่านหินซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานกันในปัจจุบัน เช่น ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก. 2594-2556, 2556) [14] ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง เพื่อผลิตซีเมนต์มอร์ตาร์ในอัตราร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยศึกษาผลของความต้องการน้ำและกำลังอัด เปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ยังมีการพิจารณาเรื่องความคุ้มค่าและผลต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้วัสดุประสานที่มีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้ง อีกทั้งยังเป็นการช่วยจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

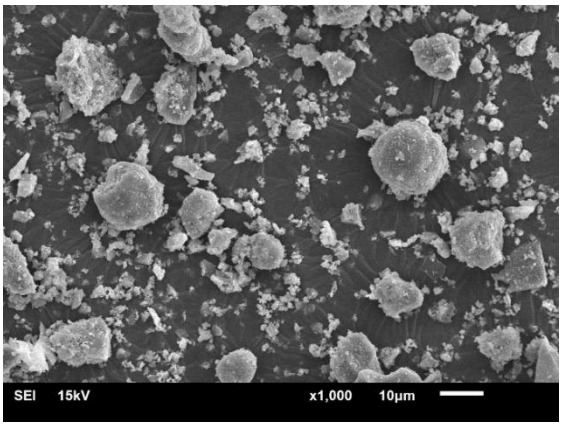
2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

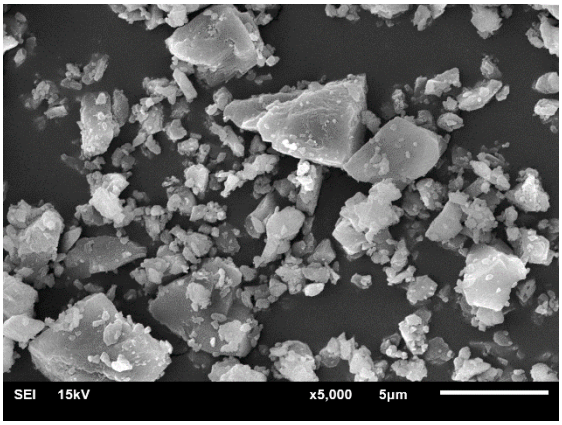
2.1.1 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) โดยเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ลักษณะทั่วไปของ OPOFA ก่อนบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 73.9 ไมโครเมตร มีสีดำปนเทา เนื้อเถ้าหยาบ ไม่มีรูปทรงชัดเจน รูปที่ 1 (a) หลังจากนำ OPOFA ไปทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบ (Los Angeles abrasion machine) เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง จะได้ GPOFA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร โดยการกระจายตัวของอนุภาคของ OPOFA และ GPOFA แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งลักษณะทั่วไปของ GPOFA มีสีดำสนิท เนื้อเถ้ามีขนาดเล็กละเอียด รูปที่ 1 (b) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.6, 1.2 และ 2.8 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบ เท่ากับร้อยละ 61.6 แสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมีของ GPOFA พบว่าอยู่ในเกณฑ์ชั้นคุณภาพที่ 1 ตามมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [11] เนื่องจากมีผลรวมขององค์ประกอบหลัก SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 10 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 12 ตามมาตรฐาน มอก. 2888-2561 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] พบว่า GPOFA อยู่ในประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งมีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่มีค่า LOI เกินร้อยละ ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] อยู่เล็กน้อย



(a) เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



(b) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



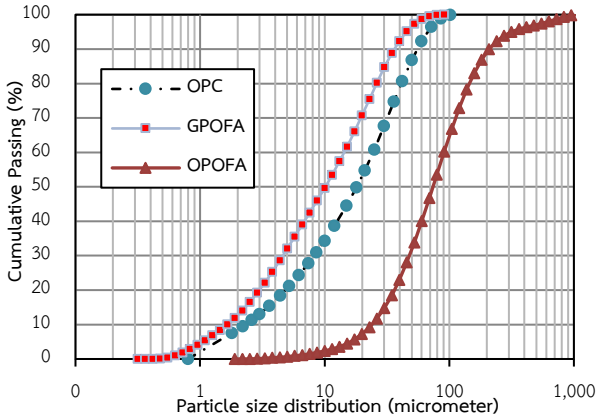
(c) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) กำลังขยาย 5,000 เท่า [6]

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาค

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) และ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

Materials		OPC	GPOFA
Physical Properties	Specific gravity	3.16	2.65
	Median particle size, d_{50} (μm)	18.1	7.7
Chemical Composition (%)	Silicon dioxide (SiO_2)	20.0	57.6
	Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.6	1.2
	Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.8
	Calcium oxide (CaO)	62.6	9.6
	Magnesium oxide (MgO)	1.2	4.7
	Potassium oxide (K_2O)	2.7	8.7
	Sodium oxide (Na_2O)	0.3	0.1
	Sulfur trioxide (SO_3)	2.4	2.2
	Phosphorus Oxide (P_2O_5)	-	5.5
	Chorine (Cl)	-	1.1
	Loss on ignition (LOI)	2.8	6.5
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	61.6

2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) มีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 [16] โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ CaO และ SiO_2 มีค่าร้อยละ 62.6 และ 20.0 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า LOI ร้อยละ 2.8 โดยทั่วไปมีสีเทาเข้ม เนื้อละเอียด มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีอนุภาคเล็กๆ เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 1 (c) [6] มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 18.1 ไมโครเมตร โดยสมบัติทางเคมี และการกระจายตัวของอนุภาค ของ OPC แสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA)

2.1.3 มวลรวมละเอียด ที่ใช้ในการศึกษาเป็นทรายแม่น้ำ ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 ค้างตะแกรงมาตรฐาน 100 โดยมีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C33 [17] ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง และค่าการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C128 [18] แสดงดังตารางที่ 2 โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.78 ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.62 และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.10 โดยมวลรวมละเอียด อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ก่อนผสม

ตารางที่ 2 สมบัติจำเพาะของมวลรวม

Properties	Fineness modulus	Specific gravity	Water absorption (%)
River Sand	2.78	2.62	1.10

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบมอร์ตาร์

การเตรียมตัวอย่างในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2.75 โดยน้ำหนัก แทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) จากการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [19] โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 [20-23] ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นหล่อตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ถอดแบบเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปบ่มน้ำสะอาด และทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตราฐาน ASTM C109 [24] ที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ได้มาจากค่าเฉลี่ยของ 5 ตัวอย่าง ซึ่งค่า

กำลังอัดของแต่ละตัวอย่างที่ได้ต้องไม่เกินร้อยละ 8.7 ของค่าเฉลี่ย ตามที่กำหนดโดย ASTM C109 [24]

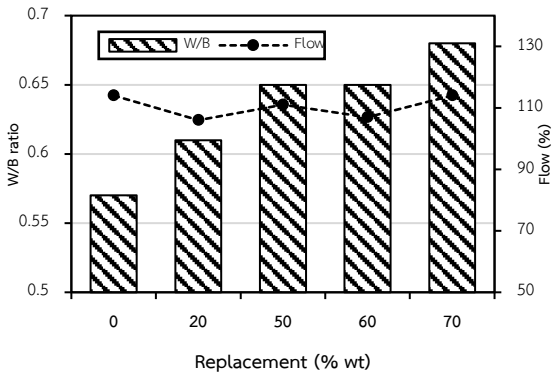
ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

Sample	Mix Proportion by Weight (g)				*Flow*
	Cement	GPOFA	Sand	W/B	*(%)*
CT	100	-	275	0.57	114
20GPOFA	80	20	275	0.61	106
50GPOFA	50	50	275	0.65	111
60GPOFA	40	60	275	0.65	107
70GPOFA	30	70	275	0.68	114

3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

3.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 แสดงความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในปริมาณที่มากขึ้น โดยมอร์ตาร์ควบคุม (CT) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.57 ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสม GPOFA อัตราส่วนร้อยละ 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่ในช่วง 110±5 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.61, 0.65, 0.65 และ 0.68 ตามลำดับ หรือใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่มีค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีรูปร่างที่กลมสลับกับขรุขระ และมีความพรุนบางส่วน [7-9, 12-13, 25] เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (50GPOFA และ 60GPOFA) เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า OPC ส่งผลให้ GPOFA มีพื้นที่ผิวมากกว่า OPC ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน เช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานที่เป็นเถ้าชีวมวลอื่น ๆ เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย [8-9, 26-27]



รูปที่ 3 ผลของร้อยละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและการไหลแผ่

3.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CT, 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) ผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 15.1, 27.6, 31.5, 39.1 และ 47.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับมอร์ตาร์ควบคุมจากงานวิจัยที่ผ่านมา [20, 28-29] เมื่อพิจารณาดัชนีกำลังของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ามอร์ตาร์ 20GPOFA มีค่าดัชนีกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 2888-2561 [11] ระบุว่าดัชนีกำลังเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน จะต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 1 และไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 2 ของมอร์ตาร์ CT เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบปรากฏว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ 20GPOFA มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 81 และ 86 ของมอร์ตาร์ CT ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 [15]

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

Sample	Compressive Strength (MPa) *(Normalized compressive strength) (%)*				
	1 Day	3 Days	7 Days	28 Days	90 Days
CT	15.1±0.71 *(100)*	27.6±0.48 *(100)*	31.5±0.27 *(100)*	39.1±0.16 *(100)*	47.4±0.51 *(100)*
20GPOFA	10.4±0.4 *3 (69)*	19.9±0.36 *(72)*	25.6±0.52 *(81)*	33.4±0.28 *(86)*	43.7±0.26 *(92)*
50GPOFA	5.7±0.22 *(38)*	14.5±0.15 *(53)*	21.4±1.49 *(68)*	30.1±0.52 *(77)*	37.5±0.46 *(79)*
60GPOFA	2.7±0.08 *(18)*	10.2±0.65 *(37)*	15.1±0.10 *(48)*	23.9±0.14 *(61)*	30.8±0.18 *(65)*
70GPOFA	1.7±0.06 *(11)*	7.1±0.27 *(26)*	9.1±0.18 *(29)*	16.1±0.23 *(41)*	23.9±0.33 *(50)*

สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) มีกำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น โดยที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน มอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.7 ถึง 21.4 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 11 ถึง 68 ของมอร์ตาร์ CT เนื่องจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีปริมาณของ OPC ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ GPOFA เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะต้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุ 1, 3 และ 7 วัน มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ CT ค่อนข้างมาก [25, 30] นอกจากนั้นเห็นได้ว่าเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ในช่วงมาตรฐาน ซึ่งส่งผล

ให้มอร์ตาร์มีค่าอัตราส่วน W/B สูงขึ้นเป็นส่งผลต่อการพัฒนาของกำลังอัดต่อมาเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 และ 90 วัน มอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีกำลังอัดเท่ากับ 30.1, 23.9, และ 16.1 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 77, 61 และ 41 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ และสามารถพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 37.5, 30.8 และ 23.9 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 79, 65 และ 50 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งได้ผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือ C-S-H จากการทำปฏิกิริยา โดย C-S-H มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน สามารถช่วยในการพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน ได้มากขึ้น นอกจากนี้การแทนที่ OPC ด้วย GPOFA (d_{50} =7.7 μm) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า OPC (d_{50} =18.1 μm) ถึง 2.35 เท่า มีส่วนในการช่วยให้เนื้อมอร์ตาร์มีความแน่นขึ้น เพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กของ GPOFA สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างช่องว่าง (Filler material) ของอนุภาคของเพสต์ และมวลรวมละเอียดได้ดียิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [11] และข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 [15] ซึ่งระบุดัชนีกำลัง (แทนที่ร้อยละ 20) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน จะต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ CT เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบปรากฏว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ 50GPOFA มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 68 และ 77 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ และสามารถพัฒนากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 79 ของมอร์ตาร์ CT ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่มีปริมาณ OPC เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น

3.3 การประเมินราคาวัสดุของมอร์ตาร์

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบราคามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง 1 ลูกบาศก์เมตร โดยราคาวัสดุของการผลิตมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย OPC เท่ากับ 3,300 บาท/ตัน (165 บาท ต่อ ปูนซีเมนต์ 1 กระสอบ) ในขณะที่ GPOFA ซึ่งมีค่าการขนส่ง, ค่าแรงงานขนย้าย (ระยะทางไม่เกิน 200 กิโลเมตร) และค่าพลังงานในการบด ประมาณ 522 บาท/ตัน มวลรวมละเอียด 460 บาท/ตัน และน้ำสะอาด 32 บาท/ตัน (1 USD=34.80 บาท) [10, 31] จากการประเมินราคา พบว่ามอร์ตาร์ CT มีราคาเท่ากับ 2,062 บาท/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่มอร์ตาร์ 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีราคาเท่ากับ 1,813, 1,439, 1,314 และ 1,189 บาท/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าราคารวมวัสดุของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 88, 70, 64 และ 58 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA สามารถลดต้นทุนราคาในการผลิตได้ประมาณร้อยละ 30-42 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT

ตารางที่ 5 ราคาวัสดุของมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร

Sample	Mix proportion, kg/m³ *(Baht/kg)*				Baht/m³	Cost Reduction (%)
	OPC	GPOFA	Fine agg.	Water		
CT	450 *(3.30)*	-	1,237.5 *(0.46)*	256.5 *(0.03)*	2,062	-
20GPOFA	360 *(3.30)*	90 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	274.5 *(0.03)*	1,813	12
50GPOFA	225 *(3.30)*	225 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	292.5 *(0.03)*	1,439	30
60GPOFA	180 *(3.30)*	270 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	292.5 *(0.03)*	1,314	36
70GPOFA	135 *(3.30)*	315 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	306.0 *(0.03)*	1,189	42

3.4 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของมอร์ตาร์

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยปริมาณการปล่อย CO_2 ของ OPC และ GPOFA มีปริมาณเท่ากับ 820.0 และ 106.0 กก. CO_2/t ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนประกอบอื่น ๆ ได้แก่ มวลรวมละเอียด และ น้ำ มีปริมาณการปล่อย CO_2 เท่ากับ 28.0 และ 1.0 kg. CO_2/t ตามลำดับ [10, 31-33] จากการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อย CO_2 ของแต่ละส่วนผสม พบว่ามอร์ตาร์ CT มีปริมาณการปล่อย CO_2 เท่ากับ 403.91 กก. CO_2/m³ ในขณะที่มอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีปริมาณการปล่อย CO_2 เท่ากับ 339.66, 243.29, 211.16 และ 179.05 กก. CO_2/m³ ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 60, 52 และ 44 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปริมาณการปล่อย CO_2 มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ลดลงเมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA สามารถลดปริมาณการปล่อย CO_2 ได้มากถึงร้อยละ 40, 48 และ 56 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหากมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จะสามารถลดการปล่อย CO_2 ที่เกิดจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งปล่อย CO_2 สูงถึงร้อยละ 5-7 ของ ทั้งหมดที่ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก ให้มีปริมาณที่ลดลง [5]

ตารางที่ 6 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร

Sample	CO_2 Emission (kg.CO_2)				CO_2 Emission (kg.CO_2/m³)	CO_2 Emission Reduce (%)
	OPC	GPOFA	Fine agg.	Water		
CT	369.00	-	34.65	0.26	403.91	-
20GPOFA	295.20	9.54	34.65	0.27	339.66	16
50GPOFA	184.50	23.85	34.65	0.29	243.29	40
60GPOFA	147.60	28.62	34.65	0.29	211.16	48
70GPOFA	110.70	33.39	34.65	0.31	179.05	56

4. บทสรุป

1. มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในปริมาณที่มากขึ้น

2. GPOFA สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในปริมาณสูงได้ โดยมอร์ตาร์ 50GPOFA มีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 77 และ 79 ของมอร์ตาร์

CT ที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ ในขณะที่มีปริมาณ OPC เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น

3. มอร์ตาร์ที่ใช้ GPOFA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนวัสดุโดยรวมของมอร์ตาร์ ได้ประมาณร้อยละ 30–42 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CT

4. มอร์ตาร์ที่ใช้ GPOFA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถลดปริมาณการปล่อย CO_2 ในการผลิตมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร ได้มากถึงร้อยละ 40 ถึง 56 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CT

5. การใช้ GPOFA แทนที่ในปริมาณร้อยละ 50 (50GPOFA) สามารถพัฒนากำลังได้ถึง 37.5 MPa อายุ 90 วัน โดยสามารถลดต้นทุนได้ถึงร้อยละ 30 และลดการปล่อย CO_2 ได้ถึงร้อยละ 40 ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นวัสดุประสานที่มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] วิจัยกรุงศรี (2564). *แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-66 ธุรกิจวัสดุก่อสร้าง*. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566, เข้าถึงได้จาก https://www.krungsri.com/th/research/industry/summary-outlook/industry-summary-outlook-2021-2023

[2] วิจัยกรุงศรี (2565). *แนวโน้มธุรกิจและอุตสาหกรรม ปี 2565-67*. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566, เข้าถึงได้จาก https://www.krungsri.com/getmedia/07201ab9-d647-4e0e-8f67-7b9b34565c95/SO_Industry_Outlook_2022_2024__220111_TH_EX.pdf.aspx

[3] EIC Industry Insight (2565). *อุตสาหกรรมก่อสร้าง และวัสดุก่อสร้างปี 2022 ยังขยายตัวท่ามกลางต้นทุนปรับตัวสูงขึ้น*. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566, เข้าถึงได้จาก https://www.scbeic.com/th/detail/ product/8311

[4] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (2562). *มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566*, เข้าถึงได้จาก https://ghgreduction.tgo.or.th/th/download-tver/6 8 - tver-publications/1228-2019-09-30-04-25-05.html

[5] Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., and Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO_2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, pp. 142-161.

[6] ทวิช กล้าแท้ Trinh Nhat Ho Tran Sambath Men วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2565). ผลกระทบของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงต่อกำลังอัดโมดูลัสยืดหยุ่นและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังสูง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, 45(1), pp. 43-57.

[7] Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Rattanashotinunt, C. (2010). Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(10), pp. 1033-1038.

[8] วิเชียร ชาลี และชัย จาตุพิทักษ์กุล. (2554). ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, 34(3), หน้า 203-213.

[9] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2556). *การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[10] Chindaprasirt, P., Kroehong, W., Damrongwiriyanupap, N., Suriyo, W. and Jaturapitakkul, C. (2020). Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash. *Journal of Building Engineering*, 31, pp. 101415.

[11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2562). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2888-2561 เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

[12] Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul C. (2010). Strength, Drying Shrinkage, and Water Permeability of Concrete Incorporating Ground Palm Oil Fuel Ash. *Cement and Concrete Composites*, 32(10), pp. 767-774.

[13] Kroehong W, Sinsiri T, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*. 25(11), pp. 4095-104.

[14] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594-2556 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

[15] American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C618-17a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM

International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[16] American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[17] American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C33 Standard specification for concrete aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[18] American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C128 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[19] American Society for Testing and Materials. (2007). *ASTM C1437 Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[20] Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 23(12), pp. 3523-3531.

[21] Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., and Chutubtim, S. (2001). A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. *Cement and concrete composites*, 23(4-5), pp. 335-343.

[22] Cheerarot, R., and Jaturapitakkul, C. (2004). A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. *Waste Management*, 24(7), pp. 701-709.

[23] Pormmoon, P., Abdulmatin, A., Charoenwaiyachet, C., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul, C. (2021). Effect of cut-size particles on the pozzolanic property of bottom ash. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, pp. 240-249.

[24] American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C109/C109M Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[25] Ul Islam, M.M., Mo, K.H., Alengaram, U.J. and Jumaat, M.Z. (2016). Durability Properties of Sustainable Concrete Containing High Volume Palm Oil Waste Materials. *Journal of Cleaner Production*, 137, pp. 167-177.

[26] Klathae, T., Tanawuttiphong, N., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., Sukontasukkul, P. and Jaturapitakkul, C. (2020). Heat evolution, strengths, and drying shrinkage of concrete containing high volume ground bagasse ash with different LOIs. *Construction and Building Materials*, 258, pp.119443.

[27] Klathae, T., Tran, T.N.H., Men, S., Jaturapitakkul, C. and Tangchirapat, W. (2021). Strength, chloride resistance, and water permeability of high volume sugarcane bagasse ash high strength concrete incorporating limestone powder. *Construction and Building Materials*, 311, pp.125326.

[28] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2008). Strength and Chloride Penetration of Mortar with Mixture Proportioning in Ternary Cementitious System. *KMUTT Research and Development Journal*, 31(4), pp. 659-869.

[29] สำเริง รักซ้อน ปุณยวัจน วงษ์วสุวัต และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2021). กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 16(2), หน้า 28-37.

[30] Men, S., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., and Ban, C. C. (2022). Strength, fluid transport and microstructure of high-strength concrete incorporating high-volume ground palm oil fuel ash blended with fly ash and limestone powder. *Journal of Building Engineering*, 56, pp. 104714.

[31] Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., Gajda, J. and Marceau, M. (2002). *Environmental life cycle inventory of Portland cement concrete*. Available Source: http://www.vangeemconsulting.com/73_Environmental_Life_Cycle_Inverntory_SN_2137.pdf, December 20, 2022.

[32] Huber Crete. (2015). *Let huber crete calcium carbonate help you produce the brightest white concrete building products possible*. Marble Falls, Texas: Huber Carbonates, LLC. Available Source: https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/ PFDocs/Let%20HuberCrete%20Help%20You%20Manufacture%20Superior%20Concrete.pdf. June 25, 2022.

[33] Leeuwen, R.V., Kim Y.J. and Sriraman, V. (2016). The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete. *Journal of Civil Engineering Research*, 6(4), pp. 104-113.