

สมบัติ mortar ใ้ก้าแกลบเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

PROPERTIES OF RICE HUSK ASH MORTAR REINFORCED WITH
COCONUT FIBER

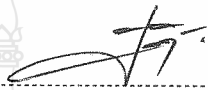


สิทธิศักดิ์ คำชาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติ mortars เถ้าแกลบเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว
Properties of Rice Husk Ash Mortar Reinforced with Coconut Fiber
ชื่อ - นามสกุล นายสิทธิศักดิ์ คำชาย
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.
ปีการศึกษา 2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

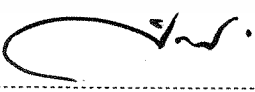

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สำเร็จ รักซ้อน, ปร.ด.)

นิรชร นกแก้ว
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.)

จตุพล ตั้งปกาศิต
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2564

| | |
|-------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | สมบัติมอร์ตาร์เถ้าแกลบเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว |
| ชื่อ-นามสกุล | นายสิทธิศักดิ์ คำชาย |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด |
| ปีการศึกษา | 2564 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึง โดยตรง และกำลังเฉือนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว 2) เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยมะพร้าวที่จะนำมาผสมกับมอร์ตาร์ และมอร์ตาร์เถ้าแกลบ

ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวจะมีขนาด 10 เซนติเมตร X 10 เซนติเมตร X 60 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร X 10 เซนติเมตร X 30 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร X 10 เซนติเมตร X 10 เซนติเมตร อัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวประกอบด้วย เส้นใยมะพร้าว : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ททราย : น้ำ จำนวน 3 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ได้แก่ A1 (150 : 450 : 450 : 600), A2 (167 : 500 : 500 : 683), A3 (183 : 550 : 550 : 770) และอัตราส่วนมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวประกอบด้วย เส้นใยมะพร้าว : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : เถ้าแกลบ : ททราย : น้ำ จำนวน 3 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ได้แก่ B1 (150 : 405 : 45 : 450 : 600), B2 (167 : 450 : 50 : 500 : 683), B3 (183 : 495 : 55 : 550 : 770) ผสมเข้าด้วยกันแล้วนำมาอัดขึ้นรูปด้วยแบบหล่ออัดความดัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงโดยตรง และกำลังรับแรงเฉือนที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมและส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงโดยตรง และกำลังรับแรงเฉือนได้ดีที่สุด คือ 183 กก./ลบ.ม. สำหรับค่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงโดยตรง และกำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของเส้นใยมะพร้าว

คำสำคัญ: เส้นใยมะพร้าว เถ้าแกลบ มอร์ตาร์ แรงดึงโดยตรง แบบหล่ออัดขึ้นรูปด้วยความดัน

Thesis Title Properties of Rice Husk Ash Mortar Reinforced with Coconut Fiber
Name-Surname Mr. Sitthisak Khamkhai
Program Civil Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Jatuphon Tangpagasit, Ph.D.
Academic Year 2021

ABSTRACT

This research aimed to: 1) study the mechanical properties of compressive strength, flexural strength, direct tensile strength, and shear strength of mortar mixed with coconut fiber and rice husk ash mortar mixed with coconut fiber, and 2) find the optimum amount of coconut fiber to mix with mortar and rice husk ash mortar.

In this experiment, rice husk ash was used to replace at 10% by weight of cement with samples size of 10 cm X 10 cm X 60 cm, 10 cm X 10 cm X 30 cm, and 10 cm X 10 cm X 10 cm. The ratio of mortar reinforced with coconut fiber consists of coconut fiber: Portland cement: sand: water with three ratios by weight which are A1 (150 : 450 : 450 : 600), A2 (167: 500: 500: 683), A3 (183: 550: 550: 770), and ratio of rice husk ash mortar reinforced with coconut fiber consists of coconut fiber: Portland cement: sand: rice husk ash: water with three ratios by weight which are B1 (150: 405: 45: 450: 600), B2 (167: 450: 50: 500: 683), B3 (183: 495: 55: 550: 770) were mixed and cast in a pressure mold. The compressive strength, flexural strength, direct tensile strength, and shear strength were tested at the age of 28 days.

The test results showed that the optimum amount of coconut fiber at 183 kg/m³ was the highest result. The effect of compressive strength, flexural strength, direct tensile strength, and shear strength increased according to the amount of coconut fiber.
Keywords: coconut fiber, rice husk ash, mortar, direct tensile strength, pressure mold

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ จตุพล ตั้งปกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ นิรชร นกแก้ว กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์สำเร็จ รักซ้อน ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และวัสดุในการทดสอบ รวมทั้งอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวก ให้ความรู้ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือภายในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย นอกจากนี้ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณบุคลากรต่างๆ ที่มีได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้ซึ่งให้ความช่วยเหลือในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ โรงงาน สามชัยโยมะพร้าว ในความอนุเคราะห์ให้เส้นโยมะพร้าว เพื่อใช้ในการงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้ทำการวิจัย ที่เลี้ยงดูอบรมสั่งสอนให้ผู้ทำการวิจัยเป็นคนดี ขอบคุณครอบครัวที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ ส่งเสริม และสนับสนุนผู้ทำการวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์นี้มีคุณค่าและประโยชน์ต่อการศึกษา ผู้ทำการวิจัยขอมอบความดีทั้งหมดให้แก่ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณ และบูรพาจารย์ทุกท่านซึ่งได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำการวิจัย อนึ่งหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องไม่ว่าจะด้วยประการใดๆ ก็ตาม ผู้ทำการวิจัยขอน้อมรับไว้เพียงแต่ผู้เดียว และขอกราบประทานอภัย ณ ที่นี้ด้วย

สิทธิศักดิ์ คำชาย

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | (3) |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (5) |
| สารบัญ..... | (6) |
| สารบัญตาราง..... | (8) |
| สารบัญรูป..... | (10) |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 11 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 11 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 12 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย..... | 12 |
| 1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ..... | 13 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 13 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 14 |
| 2.1 เส้นใยธรรมชาติ..... | 14 |
| 2.2 แก้วกลบ..... | 18 |
| 2.3 วัสดุพอลิโซลัน..... | 21 |
| 2.4 ปฏิกริยาพอลิโซลัน..... | 24 |
| 2.5 ปูนซีเมนต์..... | 25 |
| 2.6 คอนกรีต..... | 31 |
| 2.7 คอนกรีตผสมเส้นใย..... | 34 |
| 2.8 การบ่มตัวอย่างคอนกรีต..... | 35 |
| 2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์ แก้วกลบผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 36 |
| 2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 41 |
| บทที่ 3 วิธีการศึกษา..... | 50 |
| 3.1 การสำรวจและจัดหาวัตถุดิบ..... | 50 |
| 3.2 สมบัติของวัสดุเส้นใยมะพร้าว ปูนซีเมนต์ และแก้วกลบบดละเอียด..... | 50 |
| 3.3 สมบัติของปูนซีเมนต์ และแก้วกลบบดละเอียด..... | 50 |
| 3.4 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 52 |
| 3.5 อัตราส่วนผสมที่ใช้ทดสอบ..... | 54 |
| 3.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ..... | 55 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ..... | 60 |
| 4.1 สมบัติมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ..... | 60 |
| 4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล..... | 61 |
| 4.3 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัด กำลังตัด กำลังดึง โดยตรงและกำลังเฉือนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบ ผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 68 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัด กำลังตัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนต่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 69 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ..... | 73 |
| 5.1 สรุปผลการทดสอบ..... | 73 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 73 |
| บรรณานุกรม..... | 74 |
| ภาพผนวก..... | 77 |
| ภาพผนวก ก..... | 78 |
| ภาพผนวก ข..... | 87 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 92 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ชนิดของเส้นใยธรรมชาติ..... | 14 |
| ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสมบัติทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ..... | 15 |
| ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ..... | 15 |
| ตารางที่ 2.4 ค่าลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากธรรมชาติ..... | 16 |
| ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว..... | 17 |
| ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ..... | 19 |
| ตารางที่ 2.7 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบไม่บด และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด..... | 20 |
| ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางเคมีของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618..... | 22 |
| ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพของสารปอซโซลานมาตรฐาน ASTM C618..... | 22 |
| ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติมของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618.... | 23 |
| ตารางที่ 2.11 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... | 26 |
| ตารางที่ 2.12 ปริมาณสารประกอบอื่นๆ โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... | 26 |
| ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติและสารที่ประกอบอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1-5..... | 27 |
| ตารางที่ 2.14 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... | 29 |
| ตารางที่ 2.15 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนขนาดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ..... | 33 |
| ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานเชิงกลของวัสดุใยมะพร้าว..... | 50 |
| ตารางที่ 3.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดละเอียด..... | 51 |
| ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ..... | 52 |
| ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวต่อ 1 ลบ.ม. | 54 |
| ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวต่อ 1 ลบ.ม. | 54 |
| ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดละเอียด..... | 60 |
| ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่..... | 61 |
| ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 62 |
| ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 62 |
| ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 63 |
| ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 63 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 65 |
| ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 65 |
| ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 66 |
| ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 66 |
| ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสมบัติการรับกำลังมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 68 |
| ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสมบัติการรับกำลังมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน..... | 68 |
| ตารางที่ ก 1 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 79 |
| ตารางที่ ก 2 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 80 |
| ตารางที่ ก 3 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 81 |
| ตารางที่ ก 4 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 82 |
| ตารางที่ ก 5 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว... | 83 |
| ตารางที่ ก 6 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว... | 84 |
| ตารางที่ ก 7 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว..... | 85 |
| ตารางที่ ก 8 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว | 86 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 การทดสอบแรงอัด (Compressive Strength)..... | 36 |
| รูปที่ 2.2 การทดสอบแรงดัด (Flexural Strength)..... | 37 |
| รูปที่ 2.3 การทดสอบแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength)..... | 39 |
| รูปที่ 2.4 การทดสอบแรงเฉือน (Shear Strength)..... | 40 |
| รูปที่ 3.1 เส้นใยมะพร้าว..... | 52 |
| รูปที่ 3.2 ถ้ำเกลือ..... | 53 |
| รูปที่ 3.3 แบบเหล็กอัดขึ้นรูป..... | 53 |
| รูปที่ 3.4 การจัดเตรียมวัสดุตามอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 | 55 |
| รูปที่ 3.5 นำเส้นใยมะพร้าวมาคลุกเคล้ากับมอร์ตาร์หรือมอร์ตาร์ถ้ำเกลือ..... | 55 |
| รูปที่ 3.6 นำวัสดุที่ผสมเสร็จแล้วมาใส่ในแบบแล้วอัดขึ้นรูป..... | 56 |
| รูปที่ 3.7 การป้อนตัวอย่างทดสอบในน้ำ..... | 56 |
| รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM)..... | 57 |
| รูปที่ 3.9 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test) | 57 |
| รูปที่ 3.10 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength Test) | 58 |
| รูปที่ 3.11 การทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength Test) | 58 |
| รูปที่ 3.12 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength Test) | 59 |
| รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการป้อน 28 วัน. | 62 |
| รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการป้อน 28 วัน. | 64 |
| รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงโดยตรงและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการป้อน 28 วัน..... | 65 |
| รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการป้อน 28 วัน..... | 67 |
| รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์ถ้ำเกลือผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการป้อน 28 วัน..... | 69 |
| รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์ถ้ำเกลือผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการป้อน 28 วัน..... | 70 |
| รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงโดยตรงและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์ถ้ำเกลือผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการป้อน 28 วัน.. | 71 |
| รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์ถ้ำเกลือผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการป้อน 28 วัน..... | 72 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัญหาผลกระทบจากสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ทำให้มีปัญหาลูกข่ายที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางอากาศ ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวได้มีการคิดค้นวิจัยและทดลองผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมขึ้นมาเป็นอย่างมาก เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุธรรมชาติส่งผลกระทบต่อมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมน้อยและมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ วัสดุธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยั่งยืนเพราะวัสดุธรรมชาติสามารถปลูกทดแทนหมุนเวียนกันได้ โดยที่ประเทศไทยเป็นพื้นที่เกษตรกรรมเป็นหลัก เลยทำให้วัสดุธรรมชาติเหลือทิ้งจากการทำเกษตรเป็นจำนวนมาก และยังไม่มีการนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างเท่าที่ควร เนื่องจากว่ากระบวนการในการผลิตมีหลากหลายขั้นตอนและมีต้นทุนในการผลิตสูง จึงไม่สามารถนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ ดังนั้นถ้าสามารถนำวัสดุทางเกษตรกรรมมาใช้ ก็จะเป็นการช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมการผลิตได้เป็นอย่างมาก

เส้นใยมะพร้าว คือ วัสดุจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมเกษตรชนิดหนึ่งที่ทำได้ง่ายและมีปริมาณมาก โดยที่น้ำและเนื้อสามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ได้ ส่วนที่เหลือคือเปลือกมะพร้าว ซึ่งสามารถนำมาทำเป็นเส้นใยมะพร้าวได้เป็นจำนวนมากและเป็นส่วนประกอบส่วนหนึ่งในอุตสาหกรรมที่นอนและเฟอร์นิเจอร์ แต่การนำเอาเส้นใยมะพร้าวไปใช้สำหรับส่วนนี้ยังไม่มากนัก จึงเป็นเหตุทำให้มีเส้นใยมะพร้าวที่ถูกทิ้งและไม่ได้นำมาใช้งานให้เกิดประโยชน์เป็นจำนวนมาก คุณสมบัติของเส้นใยมะพร้าวที่มีลักษณะเฉพาะทางธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ยืดหยุ่น เหนียว แข็งแรง ทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ สามารถย่อยสลายได้ง่าย ดังนั้นเส้นใยมะพร้าวจึงมีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากใช้เป็นตัวยึดประสานวัสดุแต่ละอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยผสมกับน้ำ เมื่อแข็งตัวจะมีคุณสมบัติแข็งแรงแต่เปราะ มีความเหนียวต่ำ เนื่องจากเหตุนี้จึงมีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้ในงานก่อสร้างเพราะแตกหักง่าย

ถ้าแกลบ ประเทศไทยผลิตข้าวได้ปีละประมาณ 25 ล้านตัน และได้แกลบประมาณ 5 ล้านตันจากการสีข้าว [1] ถ้าแกลบคือส่วนเปลือกข้าวที่ถูกนำไปเผาไหม้และมีสารซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณร้อยละ 95 [2] หากนำแกลบไปเผาจะได้ถ้าแกลบประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักแกลบ [1] การกำจัดถ้าแกลบในปริมาณมากขนาดนี้จะส่งผลต่อมลภาวะเป็นอย่างมาก ถ้าแกลบสามารถดูดน้ำเข้าไปในอนุภาคได้อย่างง่าย เนื่องจากมีขนาดที่ไม่แน่นอน [3] จึงได้นำถ้าแกลบมาศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เพื่อที่จะ

นำไปใช้เป็นประโยชน์ และเป็นผลผลิตทางเกษตรที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำมาพัฒนาทำให้เป็นวัสดุปอชโซลานเนื่องจากเถ้าแกลบมีคุณสมบัติเป็นฉนวน มีน้ำหนักเบา ดูดซับ และมีปริมาณซิลิกาสูง

จึงมีการคิดค้นที่จะนำมาทดแทนปูนซีเมนต์เป็นบางส่วน ซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตจะต้องไม่ลดลง กำลังรับแรงจะต้องเท่าเดิมหรือต้องรับแรงได้มากกว่าเดิมจากที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเส้นใยมะพร้าวและเถ้าแกลบมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อให้เส้นใยมะพร้าวและเถ้าแกลบยึดเกาะและมีความแข็งแรง โดยมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้ทางด้านวิศวกรรม เพื่อเป็นทางเลือกในการนำวัสดุจากการเกษตรมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งวัสดุก่อสร้างในปัจจุบันจะเน้นเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเป็นหลัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานในการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือน เพื่อพัฒนานำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมที่สุดในอัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวต่อการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 วัสดุเส้นใยจากธรรมชาติ คือ เส้นใยมะพร้าว

1.3.2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยมีมอร์ตาร์และมอร์ตาร์เถ้าแกลบ

1.3.3 ใช้แท่นเหล็กอัดขึ้นรูปขนาดหน้าตัด 10x10 เซนติเมตร ยาว 60 cm ในการหล่อแต่งตัวอย่างเสริมเส้นใยมะพร้าวเพื่อการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

1.3.4 น้ำที่ใช้ผสม คือ น้ำสะอาดในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.3.5 การผสมวัสดุประสานกับวัสดุธรรมชาติเพื่อมาแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นบางส่วนทำได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมปูนขนาดเล็ก

1.3.6 การหล่อตัวอย่างโดยใช้แบบเหล็กอัดขึ้นรูป

1.3.7 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยทำการทดสอบ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงโดยตรง และกำลังรับแรงเฉือน

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 จัดหาวัสดุเพื่อทำการทดสอบ

1.4.2 นำวัสดุมาผสมตามอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไว้

1.4.3 เมื่อถอดแบบแล้วนำตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน

1.4.4 นำตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวมาทำการทดสอบกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือน

1.4.5 ทำการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้คาดว่าจะตอบสนองความต้องการในงานด้านวิศวกรรมก่อสร้างที่มีลักษณะเชิงอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมาะสม และหวังว่าจะได้รับประโยชน์จากโครงการวิจัย ดังนี้

1.5.1 ได้ทราบสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว

1.5.2 ได้ทราบปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมที่สุดในอัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวต่อการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือน

1.5.3 ได้นำวัสดุธรรมชาติที่เหลือใช้จากการเกษตรมาใช้ให้เกิดเป็นประโยชน์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติถือว่าเป็นเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีหลากหลายอย่าง เมื่อเทียบกับวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ถือว่ามีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ [4] เส้นใยธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นเครื่องนุ่งห่มและประโยชน์อื่นๆ ถึงแม้จะมีเส้นใยประดิษฐ์ที่สามารถใช้ทดแทนกันได้แต่เส้นใยธรรมชาตียังเป็นที่นิยมเนื่องจากมีสมบัติดีหลายอย่างที่มีเส้นใยประดิษฐ์ไม่มี [5] สำหรับเส้นใยที่ได้จากพืชสามารถแยกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้ เส้นใยที่ได้จากส่วนของลำต้น เช่น ไม้ไผ่ ปอ หรือลินิน เส้นที่ได้จากใบ เช่น เส้นใยศรนารายณ์ กัลฉวย เส้นใยที่ได้จากผล เช่น เส้นใยมะพร้าว ปาล์ม และส่วนเส้นใยที่ได้มาจากเมล็ด เช่น เส้นใยฝ้าย หรือนุ่น เป็นต้น [4] ผลผลิตจากเส้นใยธรรมชาติที่จะช่วยลดสถานะทางด้านสิ่งแวดล้อมมาจาก 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เส้นใยเซลลูโลส (เส้นใยจากพืช) เส้นใยโปรตีน (เส้นใยจากสัตว์) และเส้นใยแร่หรือโลหะดังแสดงในตารางที่ 2.1 [5]

ตารางที่ 2.1 ชนิดของเส้นใยธรรมชาติ

| เส้นใยธรรมชาติ | | |
|-----------------------------------|--------------|---------|
| เส้นใยเซลลูโลส | เส้นใยโปรตีน | แร่ธาตุ |
| - เมล็ด เช่น ฝ้าย | ไหม | อลูมินา |
| - ผล เช่น มะพร้าว, นุ่น, ปาล์ม | ผม | คาร์บอน |
| - หล้า เช่น ชานอ้อย, ไม้ไผ่ | ขนสัตว์ | โบรอน |
| - ใบ เช่น กัลฉวย, สับปะรด | | |
| - ก้าน เช่น ข้าว, ลินิน, ปอกระเจา | | |

(พฤดิพงศ์ พันธมนัสโสภา, 2557, น. 21)

2.1.1 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น จากส่วนด้านนอกเข้าสู่ด้านในของเส้นใย ดังนี้ ชั้นนอกสุด คือ middle lamella ซึ่งประกอบด้วย ลิกนิน (Lignin) เพคติน (Pectin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ส่วนชั้นที่สอง คือ primary cell wall ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ส่วนสุดท้ายชั้นที่สาม คือ secondary cell (S1, S2 และ S3) wall ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลลูโลส เส้นใยแต่ละชนิดมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 [5]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสมบัติทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

| เส้นใย | สมบัติทางเคมี | | | | |
|-------------|---------------|------------------|------------|------------|--------------|
| | เซลลูโลส (%) | เฮมิเซลลูโลส (%) | ลิกนิน (%) | แว็กซ์ (%) | ความชื้น (%) |
| ฝ้าย | 82.7 | 5.7 | - | - | 1.0 |
| มะพร้าว | 32-43 | 0.15-0.25 | 40-45 | - | - |
| ปอกระเจา | 64.4 | 12 | 11.8 | 0.7 | 1.1 |
| ลินิน | 64.1 | 16.7 | 2.0 | 1.5-3.3 | 3.9 |
| ป่าน | 68 | 15 | 10 | 0.8 | - |
| ปอแก้ว | 31-72 | 20.3-21.5 | 8-19 | - | - |
| ป่านศรนารณ์ | 60-78 | 10-14.2 | 8-14 | 2 | 10-22 |
| สับปะรด | 70-83 | - | 5-12.7 | - | 11.8 |
| กล้วย | 56-63 | 20-25 | 7-9 | 3 | - |
| ไผ่ | 73.8 | 12.49 | 10.15 | 3.16 | - |

(พฤติพงศ์ พันธมนัสโสภา, 2557, น. 24)

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ

| เส้นใย | สมบัติทางกายภาพ | | | |
|-------------|------------------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| | Density (g/cm ³) | Elongation (%) | Tensile Strength (MPa) | Young's Modulus (GPa) |
| ฝ้าย | 1.6 | 7-8 | 400 | 5-12 |
| มะพร้าว | 1.2 | 30 | 593 | 4-6 |
| ปอกระเจา | 1.3 | 1.5-1.8 | 393-773 | 26 |
| ลินิน | 1.5 | 2.7-3.2 | 500-1,500 | 27 |
| ป่าน | 1.47 | 2-4 | 690 | 70 |
| ปอแก้ว | 1.45 | 1.6 | 930 | 53 |
| ป่านศรนารณ์ | 1.5 | 2.5 | 511-635 | 9-22 |
| สับปะรด | 1.4 | 0.8-1 | 413-1,627 | 34-82 |
| กล้วย | 1.35 | 1-3.5 | 529-759 | 8 |
| ไผ่ | 0.91 | 1.4 | 503 | 35.91 |

(พฤติพงศ์ พันธมนัสโสภา, 2557, น. 24)

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีพอลิเมอร์หลักๆ 4 อย่าง คือ เพกทิน (Pectin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulos) ลิกนิน (Lignin) และเซลลูโลส (Cellulose) องค์ประกอบที่จัดเป็นสัดส่วนเหล่านี้จะส่งผลให้กับสมบัติของเส้นใย ส่วนใหญ่แล้วผนังเซลล์พืชจะประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงภายในผนังเซลล์ โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear Polymer) สำหรับเฮมิเซลลูโลสจัดในสัดส่วนของกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) หลังจากกำจัดลิกนินออกไปองค์ประกอบที่เหลืออยู่กับเซลลูโลส ซึ่งสมบัติทั่วไปของเฮมิเซลลูโลส คือ เป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Polymer) และมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส จึงทำให้มีการส่งผลต่อสมบัติในการสลายตัวตามธรรมชาติ การสลายตัวโดยความร้อนและการดูดความชื้น ลิกนิน (Lignin) ถือว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีหน้าที่เป็นสารยึดติดภายในผนังเซลล์ มีความเสถียรทางความร้อนสูง แต่ส่งผลกระทบต่ออายุการย่อยสลายโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพกทิน (Pectin) คือองค์ประกอบสุดท้าย เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharides) เป็นเมทริกซ์ภายในผนังเซลล์ [4]

2.1.3 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

สมบัติของเส้นใยธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณเซลลูโลส และปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดของลูเมน ขนาดของเซลล์ และจำนวนเซลล์ สำหรับเส้นใยที่มีความนุ่มจะมีการยืดตัวร้อยละ 5 แต่จะมีเหนียว ในขณะที่เส้นใยที่มีการยืดน้อยกว่าร้อยละ 5 คุณสมบัติธรรมชาติจะมีความเหนียวแต่เปราะ สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแสดงในตารางที่ 2.4 [4]

ตารางที่ 2.4 ค่าลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากธรรมชาติ

| Fiber | Density (g/cm ³) | Diameter (μm) | Tensile Strength (MPa) | Young's Modulus (GPa) | Elongation at Break (%) |
|--------|------------------------------|---------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Flex | 1.5 | 40-600 | 345-1500 | 27.6 | 2.7-3.2 |
| Hemp | 1.47 | 25-500 | 690 | 70 | 1.6 |
| Jute | 1.3-1.49 | 25-200 | 393-800 | 13-26.5 | 1.16-1.5 |
| Kenaf | - | - | 930 | 53 | 1.6 |
| Ramine | 1.55 | - | 400-938 | 61.4-128 | 1.2-3.8 |

(วิโรจน์ ไกรเทพ, 2562, น. 5)

2.1.4 เส้นใยมะพร้าว

มะพร้าว เป็นพืชตระกูลปาล์ม (Arecaceae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* [6] คือพืชที่คนไทยคุ้นเคยมานานและนำทุกส่วนของมะพร้าวมาใช้เป็นประโยชน์ เช่น น้ำและเนื้อสามารถนำมารับประทานได้ เนื้อมะพร้าวที่ได้จากผลแก่สามารถนำไปปรุงอาหารและทำขนมได้หลายชนิด [7] มีเส้นใยที่แข็งซึ่งได้มาจากเปลือกชั้นกลางของมะพร้าว ซึ่งเรียกว่า “ใยมะพร้าว” [4]

โดยทั่วไปใช้ทำผ้าเนื้อหยาบ ขนแปรง เชือก เบาะเครื่องเรือน แผ่นใยอัดสำหรับปูรองพรม และที่นอน [8] เส้นใยมะพร้าวจะเก็บเกี่ยวตามลักษณะที่แบ่งไว้ โดยที่หากเก็บเกี่ยวตอนผลมะพร้าวไม่แก่จัด จะได้เส้นใยที่เป็นสีขาวหรือน้ำตาลอ่อน ซึ่งจะไม่เหนียวแต่มีความนุ่ม หากเก็บเกี่ยวผลมะพร้าวตอนแก่เต็มที่ เส้นใยที่ได้จะเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเป็นเส้นใยที่ แข็งแรง ทนทาน หย่นเหนียว และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ความยาวของเส้นใยมะพร้าวส่วนมากจะอยู่ที่ 350 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.12-0.25 มิลลิเมตร ส่วนความหนาแน่นเส้นใยเท่ากับ 1,250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ภายใน 24 ชม. ค่าการดูดซับของเส้นใยมะพร้าวจะเท่ากับ ร้อยละ 48.04 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.48 ในส่วนของสมบัติเชิงกล จากการทดสอบแรงดึงของเส้นใยธรรมชาติที่มีความยาวของเส้นใยและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ต่างกัน ได้แรงดึงเฉลี่ยต่อเส้นเท่ากับ 280 พาสคัล ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ ASTM D 7357 [4] ในบรรดาเส้นใยพืช เส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยที่มีลิกนินเคลือบผิวมากที่สุด ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรง สำหรับกำลังรับแรงดึงของเส้นใยมะพร้าวจะน้อยกว่าเส้นใยจากกล้วยแต่มีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนจากน้ำเค็ม และต้านทานแรงปฏิกิริยาจากจุลินทรีย์ [4] ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว แสดงในตารางที่ 2.5 [4]

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว

| ส่วนประกอบของเส้นใย | ความเจริญของเส้นใย (maturity) (ร้อยละต่อน้ำหนักแห้งของเส้นใย) | | |
|--|--|--------------------|-----------------------|
| | อ่อน (very young) | ปานกลาง (young) | โตเต็มที่ (mature) |
| อินทรีย์สาร (Organic matter) | | | 98.8 |
| อนินทรีย์สาร (Inorganic matter) หรือ สารที่ละลายในน้ำได้ (Water-soluble substances) | | | 1.2 |
| เปกติน (Pectin) | 15.5 | 1.6 | 5.2 |
| เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) | 4 | 2.7 | 3 |
| สารที่ไม่ละลายน้ำ (Water insoluble substances) | 0.25 | 0.15 | 0.25 |
| ลิกนิน (Lignin) | 84.5 | 84 | 94.8 |
| เซลลูโลส (Cellulose) | 41 | 40.5 | 45.8 |
| แร่ธาตุ (Mineral elements) | 36.1 | 32.9 | 43.4 |
| โปแตสเซียม (K) | | | 0.02 |
| ฟอสฟอรัส (P) | | | 0.01 |
| แคลเซียม (Ca) | | | 0.06 |
| แมกนีเซียม (Mg) | | | 0.04 |
| ไนโตรเจน (N) | | | 0.35 |
| โปรตีน | | | 2.2 |

(วัชรินทร์ แซ่หลายเทพ, 2544, น. 26)

2.2 เถ้าแกลบ

ใน 1 ปี ทั่วโลกสามารถเก็บเกี่ยวข้าวได้ประมาณ 600 ล้านตัน [9] ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากที่สุดในโลก โดยมีกำลังในการผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน [1] และจะได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตันของข้าวเปลือก [1] เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) คือผลิตผลพลอยที่ได้จากการเผาแกลบ ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในงานต่างๆ เช่น เผาฐาน หรือเผาอิฐ เป็นต้น มีซิลิกา ออสซิลิกอนที่มีพื้นที่ผิวสูงเป็นองค์ประกอบหลัก แกลบจะถูกเผาโดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส และสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตได้ [10]

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

เปลือกข้าวที่ถูกเผาใหม่เรียกว่าเถ้าแกลบ มีซิลิกา (silica, SiO_2) เป็นสารประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 95 [2] สำหรับเถ้าแกลบที่ถูกเผาในประเทศไทยมี SiO_2 อยู่ประมาณ 92.28 [2] ที่เหลือคือออกไซด์ของโซเดียม โพรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 0.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition หรือ LOI) ร้อยละ 3.7 [11] อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบส่งผลต่อค่า LOI เนื่องจากหากมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้ค่า LOI สูงขึ้น [2]

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบชนิดต่างๆ

จากอุณหภูมิในการเผา เถ้าแกลบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้เถ้าแกลบที่เป็นสีขาวและมีซิลิกาชนิดผลึกมากกว่าร้อยละ 90 ขององค์ประกอบทางเคมี หากนำเถ้าแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส จะได้เถ้าแกลบที่เป็นสีดำ โดยมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาอสซิลิกอนซึ่งอยู่ประมาณร้อยละ 85-90 ขององค์ประกอบทางเคมี จากการค้นคว้าพบว่า การนำเถ้าแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะได้เถ้าแกลบที่เป็นสีดำและไวต่อการปฏิกิริยาทางเคมี สำหรับเถ้าแกลบขาวที่มีซิลิกาผลึกเป็นองค์ประกอบจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีช้ากว่าเถ้าแกลบดำที่มีซิลิกาอสซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ การดูดซึมธาตุอาหารของต้นข้าวทำให้ซิลิกาเป็นองค์ประกอบของแกลบ เปลือกข้าวมีโครงสร้างที่แข็งแรงเนื่องจาก การรวมตัวกันของเส้นใยอินทรีรีและธาตุซิลิคอน [10]

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเถ้าแกลบและวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) คือ วัสดุที่สามารถนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในบางส่วนเพื่อเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับการผลิตคอนกรีต การนำวัสดุปอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณหนึ่งถือว่าการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีต เช่น สมบัติในการทำงานและพัฒนาความแข็งแรง ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมอีกส่วนหนึ่ง คือ การลดต้นทุนค่าซีเมนต์ ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่เป็นของเสีย เถ้าแกลบบดละเอียดซึ่งมีซิลิกา เป็นองค์ประกอบทางเคมี เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดและมีพื้นที่ผิวสูงมาก การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิกา ขนาด พื้นที่ผิวของอนุภาค และวัฏภาคผลึกซิลิกา เถ้าแกลบจะดูดซับน้ำบางส่วนของส่วนผสม ส่งผลให้รับกำลังอัดของคอนกรีตได้มากขึ้น [10]

2.2.4 ผลของการเติมเถ้าแกลบต่อสมบัติของคอนกรีต

การเติมข้าวแกลบบดละเอียดทำให้ความทนทานของคอนกรีตถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถปรับสภาพของคอนกรีตและสมบัติทางเคมีได้ เถ้าแกลบบดละเอียดช่วยลดการแทรกซึมผ่านเนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กที่สามารถบรรจุอนุภาคช่วยลดปริมาตรรูพรุนของซีเมนต์ได้ และยังช่วยการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์และวัสดุ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ในซีเมนต์พิเศษจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของเถ้าแกลบบดละเอียดและอัลคาไลซึ่งจะกลายเป็นอัลคาไลซิลิเกต ช่วยลดการเกิดความเสียหายจากการทำปฏิกิริยาของอัลคาไลที่เหลื่อมล้ำกับส่วนผสมซิลิเกตของคอนกรีตในภายหลัง การเติม เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตทำให้การยึดเกาะของส่วนผสมดีขึ้น ส่งผลให้รับแรงอัดและแรงดึงได้มากขึ้น หากเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบบดละเอียดอัตราส่วนน้ำก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกันเพื่อการยึดเกาะของส่วนผสม ซึ่งจะส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มมากขึ้นและค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของน้ำ [10]

2.2.5 ปริมาณการผลิตเถ้าแกลบและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของเถ้าแกลบ

จากการเกษตรส่งผลให้แกลบเป็นผลิตภัณฑ์พลอยร้อยละ 20-22 ของน้ำหนักข้าวเปลือก แกลบประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 50 ลิกนินร้อยละ 25-30 และซิลิการ้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก หากนำเถ้าแกลบไปเผา ลิกนินและเซลลูโลสจะหายไปเหลือเพียงซิลิกา จากการเผาแกลบจะได้เถ้าแกลบเพียงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของแกลบที่ถูกเผา จึงเป็นเหตุทำให้ทั่วโลกสามารถผลิตข้าวได้ปีละ 649.7 ล้านตัน เถ้าแกลบปริมาณมากส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสถานที่ที่ถูกนำไปทิ้ง เนื่องจากไม่มีการนำมาใช้งาน หากมีการนำเถ้าแกลบที่เหลือทิ้งมาใช้ในงานคอนกรีตหรือวัสดุ ปัญหาที่จะนำเถ้าแกลบไปทิ้งก็จะลดลง ซึ่งปัจจุบันนี้เถ้าแกลบถูกมาใช้เป็นประโยชน์ในงานต่างๆ เนื่องจากเถ้าแกลบมีสมบัติและศักยภาพในการใช้งานที่ดี เป็นวัสดุฉนวนคลาสเอ ติดไฟยากและไม่เกิดเชื้อราง่าย [10]

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

| องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | เถ้าแกลบ |
|--------------------------------|----------------------|----------|
| SiO ₂ | 20.40 | 90.62 |
| Al ₂ O ₃ | 5.40 | 0.25 |
| Fe ₂ O ₃ | 31.0 | 0.20 |
| CaO | 63.71 | 0.85 |
| K ₂ O | 0.54 | 2.17 |
| Na ₂ O | 0.08 | 0.04 |
| LOI | 2.83 | 5.39 |

(สุชีพ ศรีซ, 2559, น. 50)

2.2.6 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบไม่บด และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

ความชื้นเหลือของซีเมนต์เพสต์จะถูกแสดงในตารางที่ 2.7 ในระยะระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบและทรายบด พบว่า ปูนซีเมนต์เพสต์มีค่าความชื้นเหลือปกติต่ำกว่าเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบส่งผลให้การดูดซับน้ำมีค่ามากขึ้น [9]

ส่วนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) พบว่า เมื่อนำเถ้าแกลบไม่บดมาแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 จะส่งผลให้การก่อตัวในช่วงต้นและการก่อตัวในช่วงปลายมีเวลาน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วนประมาณ 42-49 นาที หากการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บดถูกเพิ่มปริมาณ จะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายลดลง

ส่วนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) พบว่า เมื่อนำเถ้าแกลบบดละเอียดมาแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 จะส่งผลให้การก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายมีเวลาน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วนประมาณ 23-45 นาที หากปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดถูกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นลดลง อย่างไรก็ตาม ASTM C 150 กำหนดไว้ว่า ซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดยังมีระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายเป็นไปตามมาตรฐานแต่ไม่ควรน้อยกว่า 45 นาที และไม่ควรเกินกว่า 375 นาที [9]

ตารางที่ 2.7 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบไม่บด และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

| ชนิดของเพสต์ | ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ (ร้อยละ) | เวลาก่อตัวระยะต้น (นาที) | เวลาก่อตัวระยะปลาย (นาที) |
|--------------|--|--------------------------|---------------------------|
| Cement | 25 | 103 | 180 |
| URH10 | 41 | 61 | 105 |
| URH20 | 37 | 45 | 90 |
| GRH10 | 40 | 80 | 135 |
| GRH20 | 41 | 67 | 135 |

(สุชีพ ศรีช, 2559, น. 51)

2.2.7 ความละเอียดของเถ้าแกลบ

ส่วนมากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นที่นิยมในการใช้วัดขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ โดยที่ความละเอียดจะขึ้นอยู่กับเวลา วิธีในการบด และวิธีการเผา เช่น หากนำเถ้าแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เถ้าแกลบจะมีพื้นที่ผิวสูงสุด หากเผาในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลงอย่างมาก ทำให้โครงสร้างที่มีความพรุนถูกทำลายเนื่องจากการเป็นผลึก เถ้าแกลบส่วนใหญ่ที่ใช้มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 5-20 ไมครอน ซึ่งมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ [2]

2.2.8 ความถ่วงจำเพาะ

วิธีการของการเผาจะส่งผลต่อความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีสิ่งที่ไม่เผาไหม้ไม่หมด ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะต่ำและทำให้คาร์บอนปนอยู่มาก สำหรับเถ้าแกลบที่เผาไหม้สมบูรณ์จะมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.9-2.3 และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาเถ้าแกลบ หากนำเถ้าแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C ความถ่วงจำเพาะจะอยู่ที่ประมาณ 2.06 และหากนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1,000 °C จะได้ความถ่วงจำเพาะเป็น 2.20 และ 2.30 ตามลำดับ โดยการลดน้อยลงของคาร์บอนจะทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น [11]

2.2.9 ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ

การทดสอบค่าดัชนีกำลังตามมาตรฐาน ASTM C 311 [9] สามารถวัดความเป็นวัสดุปอซโซลานได้ โดยการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 7 และ 28 วัน หรือที่มีการนำเถ้าแกลบมาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สำหรับค่ากำลังที่ทดสอบได้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าของกำลังมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนเรียกว่า ค่าดัชนีกำลัง หากค่าดัชนีกำลังมีค่าที่สูงจะบ่งบอกถึงความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีของเถ้าแกลบ [9]

2.3 วัสดุปอซโซลาน

ในกลุ่มของสารปอซโซลานเถ้าแกลบสามารถเป็นสารผสมแบบแร่ธาตุได้ชนิดหนึ่ง [12] และเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ถูกนำมาศึกษาเพื่อนำไปใช้ในงานคอนกรีต เนื่องจากถูกนำมาใช้น้อยมากและต้องนำไปกำจัดมากขึ้น [13] เถ้าลอยถือว่าเป็นหนึ่งในสารผสมแบบแร่ธาตุ นอกเหนือจากเถ้าลอยแล้ว ในโรงงานอุตสาหกรรมยังมีสารผสมแบบแร่ธาตุของกลุ่มสารปอซโซลานชนิดอื่นๆ ที่เป็นของเสีย เช่น ผงฝุ่นซิลิกาตามมาตรฐาน ASTM C618 การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับคอนกรีตส่งผลให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นหลายด้าน ได้แก่ การทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด, สภาวะแวดล้อมที่เป็นซัลเฟต, การลดการหดตัว และการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว เป็นต้น [14] วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีอะลูมินาและซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ปกติวัสดุดังกล่าวจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานแต่หากทำปฏิกิริยากับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติแล้วจะส่งผลให้วัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานทันที เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยได้จำแนกสารปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ [12] ได้แก่

2.3.1 ชั้นคุณภาพ N (Class N) คือ ปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้แล้วเพื่อคุณสมบัติตามต้องการ [12]

2.3.2 ชั้นคุณภาพ F (Class F) คือ เถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินชนิดบิทูมินัสหรือแอนทราไซต์ ซึ่งผลรวมของปริมาณจะประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ต่ำและมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 และ 2.10 ซิลิกา (SiO_2) จะได้จากดินเหนียวและตอวอร์ตซ์เนื่องจากบิทูมินัสและถ่านหินแอนทราไซต์มีแร่ดินเหนียวสูงจึงส่งผลให้เถ้าลอยมีปริมาณซิลิกา (silica ; SiO_2) สูง [12]

2.3.3 ชั้นคุณภาพ C (Class C) คือ แก้วลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินชนิดลิกไนต์ ผลรวมของซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มากกว่าร้อยละ 50 (SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ ≥ 50) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 และ 2.11 [12]

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางเคมีของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

| ข้อกำหนดทางเคมี | ชั้นคุณภาพ | | |
|--|------------|-----|-----|
| | N | F | C |
| ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂), อะลูมิเนียม ออกไซด์ (Al ₂ O ₃), ไอออน ออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ | 70 | 70 | 50 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) ไม่ เกินร้อยละ | 4 | 5 | 5 |
| ปริมาณความชื้น, ไม่ เกินร้อยละ | 3 | 3 | 3 |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ | 10 | 6 | 6 |
| ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na ₂ O (ไม่เกินร้อยละ) | 1.5 | 1.5 | 1.5 |

(ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2559, น. 10)

หมายเหตุ:

1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
2. หากมีผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้หรือมีผลของการใช้งานก็สามารถใช้แก้วลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้
3. ปริมาณนี้ใช้ในการระบุอัลคาไลที่ไม่เกินกำหนดและคอนกรีตที่มีมวลรวมทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพของสารปอซโซลานมาตรฐาน ASTM C618

| คุณสมบัติทางกายภาพ | ชั้นคุณภาพ | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| | N | F | C |
| ความละเอียด | | | |
| - ปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) ^A ร่อนโดยใช้น้ำ (ไม่เกินร้อยละ) | 34 | 34 | 34 |
| ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | | | |
| - ที่อายุ 7 วัน (อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม) | 75 ^B | 75 ^B | 75 ^B |
| - ที่อายุ 28 วัน (อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม) | 75 ^B | 75 ^B | 75 ^B |
| - ความต้องการน้ำ (สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม) | 115 | 115 | 115 |
| ความคงตัว (soundness) ^C | | | |
| - การขยายตัวหรือหดตัวออตเคลฟ (ไม่เกินร้อยละ) | 0.8 | 0.8 | 0.8 |

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางกายภาพของสารปอซโซลานมาตรฐาน ASTM C618 (ต่อ)

| กำหนดด้านความสม่ำเสมอ ^D | | | |
|--|---|---|---|
| - ความหนาแน่น (ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ) | 5 | 5 | 5 |
| - ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) (ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ) | 5 | 5 | 5 |

(ปณิธี เปรมสัถยธรรม, 2559, น. 11)

หมายเหตุ:

A ระวางไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนตะแกรง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัว ออโตแคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละอันต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมดถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติมของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

| คุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติม | ชั้นคุณภาพ | | |
|--|------------|-----|-----|
| | N | F | C |
| แฟคเตอร์ผลคูณ (multiple factor) ของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) กับปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) เมื่อร้อนโดยใช้น้ำ (ไม่เกินร้อยละ) | - | 255 | - |
| การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแห้งตัวอย่างมอร์ตาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (ไม่เกินร้อยละ) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้ปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง (ไม่เกินร้อยละ) | 20 | 20 | 20 |
| ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ (ไม่เกินร้อยละ) | 100 | 100 | 100 |

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติมของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (ต่อ)

ประสิทธิภาพในการช่วยต้านสารซัลเฟต*

วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ

- | | | | |
|--|------|------|------|
| - สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน (ไม่เกินร้อยละ) | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| - สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน (ไม่เกินร้อยละ) | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ

- | | | | |
|---|-----|-----|-----|
| - เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต ในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน (ไม่เกินร้อยละ) | 100 | 100 | 100 |
|---|-----|-----|-----|

(ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2559, น. 12)

หมายเหตุ

* ในการต้านทานซัลเฟตจะต้องมีปริมาณปอซโซลานไม่เกินร้อยละ ± 2 ของการทดสอบหรือให้อยู่ในเกณฑ์ระหว่างสองค่าของการทดลอง

ในตารางที่ 2.9 จะพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าลอย ซึ่งสามารถใช้ค่าดัชนีกำลังในการวัดค่าความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของสารปอซโซลานได้ ดังสมการที่ (2.1) [12]

$$\text{ดัชนีกำลังมอร์ตาร์} = (A/B) \times 100 \quad (2.1)$$

โดย A = กำลังอัดของมอร์ตาร์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

B = กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถ้าลอยในส่วนผสม

2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

หากเถ้าลอยถูกนำผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) กับน้ำจนในที่สุดกลายเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) กับอลูมินา (Al₂O₃) และซิลิกอนออกไซด์ (SiO₂) เพื่อให้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrate; 3CaO 2Al₂O 3H₂O) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate; 3Ca 2SiO₂ 3H₂O) ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ทำให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (cementitious) คล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12]



เนื่องจากแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน จึงสามารถนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตได้ ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของ

คอนกรีตเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีการเชื่อมประสานที่ดี การเกิดปฏิกิริยาของปอซโซลานค่อนข้างช้าและต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7-14 วัน และจะมีปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ นอกจากนี้ หากเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น จะทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้เร็วขึ้น [12]

2.5 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการนำส่วนผสมต่างๆ ไปเผา ซึ่งประกอบด้วย ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน ออกไซด์ของธาตุแคลเซียมจำพวกหินปูน (limestone) ออกไซด์ของธาตุเหล็กจำพวกลูกกรัง (laterite) และอลูมิเนียมจำพวกดินเหนียว ที่อุณหภูมิ 1,400 – 1,500 องศาเซลเซียส จนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการระเหยจนได้เป็นเม็ดปูนซีเมนต์ แล้วนำเม็ดปูนซีเมนต์ไปบดให้กลายเป็นผงละเอียด หากนำไปผสมกับน้ำจะได้วัสดุประสานที่มีความแข็งแรง [12]

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12]

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีสารประกอบอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ สารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง ดังแสดงในตารางที่ 2.11 ซึ่งรายละเอียดของสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์มีดังนี้

2.5.1.1 สารประกอบออกไซด์หลัก (major oxide) ได้แก่

- (1) แคลเซียมออกไซด์ (CaO)
- (2) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂)
- (3) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃)
- (4) เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃)

ซึ่งหากนำกลุ่มออกไซด์เหล่านี้มารวมกันจะมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2.5.1.2 สารประกอบออกไซด์รอง (minor oxide) ได้แก่

- (1) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)
- (2) ออกไซด์ของอัลคาไลในรูปโซเดียมออกไซด์ (Na₂O)
- (3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O)
- (4) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃)

ตารางที่ 2.11 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

| กลุ่ม | สารประกอบประเภทออกไซด์ | ชื่อย่อ | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|
| ออกไซด์หลัก | แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) | CaO | 60.0 - 67.0 |
| | ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) | SiO ₂ | 17.0 - 25.0 |
| | อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) | Al ₂ O ₃ | 3.0 - 8.0 |
| | เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) | Fe ₂ O ₃ | 0.5 - 6.0 |
| ออกไซด์รอง | แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) | MgO | 1.0 - 4.0 |
| | โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide) | Na ₂ O | 0.2 - 1.3 |
| | โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide) | K ₂ O | 0.2 - 1.3 |
| | ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur trioxide) | SO ₃ | 0.1 - 3.0 |

(ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2559, น. 10)

นอกจากนี้ยังเหลือสารประกอบอื่นๆ อีก ที่ถูกจัดในรูปของการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเกิดจากการเผา และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Odler, 1998) ดังแสดงในตาราง 2.12

ตารางที่ 2.12 ปริมาณสารประกอบอื่นๆ โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

| สารประกอบอื่นๆ | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|--|------------------|
| สารประกอบอื่นๆ | 0.5 - 3.0 |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition; LOI) | 0.1 - 3.0 |
| กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue) | 0.20 - 0.75 |

(ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2559, น. 10)

2.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตามมาตรฐาน ASTM C 150 ได้กำหนดไว้ว่า ให้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามความเหมาะสมกับงานก่อสร้างได้ 5 ชนิด ดังนี้ [15]

2.5.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้กับงานคอนกรีตทั่วไป [16] ซึ่งเป็นปูนปอร์ตแลนด์แบบพื้นฐานและมีความมาตรฐาน เหมาะที่จะใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) เช่น ถนน สะพาน เสาอาคารทั่วไป และอื่นๆ [15]

2.5.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ดัดแปลง (Modified Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสารซัลเฟตปานกลาง [17] มีความร้อนต่ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 เหมาะกับงานคอนกรีตมวล (Mass Concrete) สะพาน เขื่อน ตอม่อขนาดใหญ่ และอื่นๆ [15]

2.5.2.3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High-early Strength Portland Cement) เป็นชนิดปูนที่ให้กำลังสูงในช่วงแรก [17] เนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความร้อนสูง และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานที่แข่งกับเวลา หรือจำเป็นที่จะต้องถอดแบบเร็วกว่ากำหนด [12]

2.5.2.4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มีความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) [16] เป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษที่มีความร้อนต่ำเนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ต่ำ แต่มีปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ค่อนข้างสูง [12] และกำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ [15] ใช้งานสำหรับงานคุณสมบัติพิเศษ เช่น งานคอนกรีตหนา เป็นต้น [12]

2.5.2.5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดที่ 5 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่สามารถทนทานซัลเฟตได้สูง (Sulfate resisting Portland Cement) [16] ทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมากเนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3A) ต่ำ เหมาะกับงานคอนกรีตที่สร้างในบริเวณที่มีดินเค็มหรือน้ำทะเล เนื่องจากการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้เวลานานกว่าประเภทอื่นๆ [12]

ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติและสารที่ประกอบอยู่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1-5

| ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม | ประเภทปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ | | | | |
|--------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| C_3S | 49 | 46 | 56 | 25 | 43 |
| C_2S | 25 | 29 | 15 | 50 | 36 |
| C_3A | 12 | 6 | 12 | 5 | 5 |
| C_4AF | 8 | 12 | 8 | 12 | 13 |
| ความละเอียด (เบลน, ตร.ชม./กรัม) | 3,000 | 3,000 | 4,500 | 3,000 | 3,000 |
| กำลังอัด (3 วัน, กก./ชม.) | 180 | 150 | 310 | 80 | 120 |
| ความร้อนปฏิกิริยา (28 วัน, จูล/กรัม) | 400 | 330 | 430 | 270 | 310 |

(วรนุช ตีละมัน, กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล และ กิติยศ ตั้งสัจจวงศ์, 2559, น. 14)

หมายเหตุ กำลังอัดวัดจากลูกบาศก์มอร์ตาร์ขนาด 50 มิลลิเมตร

2.5.3 สมบัติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

การทดสอบคุณสมบัติให้เทียบปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM มีดังนี้

2.5.3.1 ความละเอียด (Fineness) ASTM C 155 หรือ C 204 มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration) ยิ่งปูนซีเมนต์มีความละเอียดมากเท่าไรความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาก็เร็วมากเท่านั้น เพียง 7 วัน ก็สามารถรับกำลังได้อย่างเต็มที่ [15]

2.5.3.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ASTM C 188, C 204 จากการทดลองพบค่าเฉลี่ยของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยประมาณที่ 3.12 – 3.16 สำหรับปูนซีเมนต์ตราเสือเท่ากับ 2.90 ส่วนตราเอราวัณและตราช้างเท่ากับ 3.05 ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นประโยชน์และมีความสำคัญต่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Mixed Design) [15]

2.5.3.3 ความอยู่ตัว (Soundness) ASTM C 151 การแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ที่คงอยู่ในสภาพปริมาตรหลังการก่อตัว โดยการทดสอบทางกายภาพ [15]

2.5.3.4 เวลาของการก่อตัว (Time of Setting) ASTM C 226 หรือ C 191 คุณสมบัติที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับเวลา คือ การก่อตัว คอนกรีตมีความจำเป็นที่จะต้องอยู่ในสภาพเหลวหนานพอที่จะทำการเทและแต่งผิวได้ [15]

การทดลองการก่อตัวถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ การก่อตัวครั้งแรก (Initial set) ในการทดสอบไวแคท (Vicat) จะใช้เวลาไม่น้อยกว่า 45 นาที โดยที่การทดสอบแบบกิลล์มอร์ (Gilmore) มีการใช้เวลาไม่น้อยกว่า 60 นาที สำหรับการก่อตัวครั้งสุดท้าย (Final Set) เกิดขึ้นไม่น้อยกว่า 10 ชม. ส่วนปูนซีเมนต์ตราเสือและตราช้างมีเวลาในการก่อตัวถึง 90 นาที [15]

2.5.3.5 กำลัง (Strength) ASTM C 109 หมายถึง ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) โดยใช้ก้อนลูกบาศก์ของมอร์ตาร์ (Mortar) ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 109 โดยที่ก้อนตัวอย่างทดลองจะถูกนำไปกวดที่อายุ 7 และ 28 วัน ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ค่าของการรับกำลังต่อหน่วยพื้นที่ เช่น กก./ตร.ซม. เป็นต้น [15]

ส่วนการทดสอบการรับแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C 190 และ BS 12 จะทำการหล่อมอร์ตาร์รูปรีเคท (Briquettes) เป็นรูปโค้งหัวมน 2 ข้าง เพื่อการยึดและช่วงกลางจะมีพื้นที่ 1 ตร.นิ้ว ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ค่าของการรับกำลังต่อหน่วยพื้นที่ เช่น กก./ตร.ซม. เป็นต้น [15]

2.5.3.6 การทดสอบความชื้นเหลว (Consistency Test) โดยการใส่น้ำร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ปริมาณ 500 กรัม นำदान Plunger ของเครื่องไวแคทมาปล่อยในซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาที แล้วทำการวัดค่าทรุดตัว (Penetration) เป็น มม. จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณน้ำ 1-2 ลบ.ซม. จนกระทั่งน้ำที่ใช้ในการทดลองรวมกันทั้งสิ้นประมาณร้อยละ 30 นำค่ามาเขียนกราฟโดยที่แนวนอนคือ ระยะการทรุดตัวของ Plunger ส่วนแนวตั้งคือ จำนวนน้ำ ลบ.ซม. (CC) ให้ลากเส้นจากส่วนการทรุดตัวที่ 10 มม. ไปสัมผัสกับเส้นโค้งในกราฟแล้วขีดเส้นฉากไปทางเส้นตั้งที่แสดงจำนวนน้ำที่ใส่โดยคิดเป็นร้อยละ จากนั้นให้นำจำนวนน้ำมาตั้งแล้วหารด้วยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (ตราเดียวกัน) แล้วคูณด้วย 100 ผลลัพธ์ที่ได้คือ จำนวนร้อยละของน้ำที่พอเหมาะสำหรับความชื้นเหลว ซึ่งส่งผลทำให้มีความแข็งแรงมากที่สุด [15]

2.5.4 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12]

หากนำสารออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไปเผาจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบในรูปร่างต่างๆ ในปูนซีเมนต์มีปริมาณสารสำคัญมากกว่าร้อยละ 90 ส่งผลให้เป็นตัวกำหนดให้กับปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.14 ซึ่งสารประกอบสำคัญดังกล่าวประกอบด้วย 4 ชนิด ได้แก่

ตารางที่ 2.14 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

| ชื่อสารประกอบ | ส่วนประกอบทางเคมี | ชื่อย่อ |
|----------------------------|--|-----------------------|
| Tricalcium silicate | 3CaO SiO_2 | C_3S |
| Dicalcium silicate | 2CaO SiO_2 | C_2S |
| Tricalcium aluminate | $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ | C_3A |
| Tetracalciumaluminoferrite | $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |

(วรรณุช ตีละมัน, กัลทิมา เขาว์ชาญชัยกุล และ กิตติยศ ตั้งสัจจวงศ์, 2559, น. 16)

2.5.4.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate, C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S คือ เมื่อนำไปผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัว และให้กำลังอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก โดยในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณ C_3S อยู่ประมาณร้อยละ 45-55 [12]

2.5.4.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate, C_2S) เป็นสารประกอบที่มีอยู่หลายรูปแบบ หาก C_2S อยู่ในอุณหภูมิทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลมและมีคุณสมบัติยืดเกาะ เมื่อนำไปผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะส่งผลให้กำลังอัดใกล้เคียงกับไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยในปูนซีเมนต์จะมีไดแคลเซียมซิลิเกตอยู่ประมาณร้อยละ 15-35 [12]

2.5.4.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate, C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีสีเทาอ่อน เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดการก่อตัวทันที (Flash set) มีการพัฒนากำลังภายในไม่เกินประมาณ 2 วัน แต่หากนำไปเทียบกับไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate, C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate, C_2S) จะมีกำลังอัดค่อนข้างต่ำ โดยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตอยู่ประมาณร้อยละ 7-15 [12]

2.5.4.4 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalciumaluminoferrite, C_4AF) อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid solution) ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและเกิดการก่อตัวภายในไม่กี่นาที กำลังของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ค่อนข้างต่ำและต่ำกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate, C_3A) โดยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์อยู่ประมาณร้อยละ 5-10 [12]

2.5.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement Hydration)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือ ผลลัพธ์ระหว่างการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ซึ่งจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก (Structure of Hydration Cement Paste) ไฮเดรทซีเมนต์ (Hydrate Cement Paste; HCP) หรือเพสต์ (Paste) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ [12]

2.5.5.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate; $3\text{Ca} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) คือผลลัพธ์ เมื่อไตรแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (2.4) และ (2.5) [12]



เมื่อผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันดังกล่าวแข็งตัว จะมีรูปร่างผลึกที่ไม่เสถียรภาพ เนื่องจากมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน อีกทั้งความพรุนของ C-S-H ที่ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน สำหรับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้นั้นจะส่งผลดีต่อปูนซีเมนต์ สามารถป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ เนื่องจากผสมมีค่าพีเอชประมาณ 12.5 [12]

2.5.5.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้ซีเมนต์เฟสเกิดการก่อตัวอย่างทันที (flash set) ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7) [9]



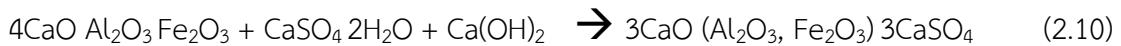
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดปัญหาในการทำงาน จึงนำยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) มาใส่ในช่วงกระบวนการบดเม็ดปูนซีเมนต์เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหา เนื่องจากจะช่วยหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดช้าลง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยิปซัมและไตรแคลเซียม (C_3A) ส่งผลให้เกิดชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite) หุ้มรอบอนุภาคของไตรแคลเซียมอลูมิเนตดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)



ชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite) ทำให้ไตรแคลเซียมเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (C_3A) ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะมีผลต่อการก่อตัวในช่วงแรก เป็นส่วนมาก โดยเอททริงไกต์ (Ettringite) ไม่ได้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต เนื่องจากซีเมนต์เฟสมีปริมาณมากเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่ซีเมนต์เฟสได้เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ส่งผลให้ชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite) แตกออกและทำให้เกิดปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนตขึ้นในขณะนั้น ต่อมาเอททริงไกต์ (Ettringite) ชั้นใหม่ก็จะมาหุ้มอนุภาคของไตรแคลเซียมอลูมิเนตและชั้นตอนดังกล่าวก็จะสลับกันไปเรื่อยๆ จนกว่าองค์ประกอบของ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือซัลเฟตไอออน ($\text{Ca}^{2+} \text{SO}_4^{2-}$) มีปริมาณเหลือไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดชั้นของเอททริงไกต์ได้อีก [12]

2.5.5.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ในช่วงเริ่มแรก ซึ่งเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำให้กลายเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายเข็มของซัลโฟลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Sulphoferrite) ดังสมการที่ (2.10) [12]



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าอัตราในการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วที่สุดคือ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) รองลงมาคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ต่อมาคือ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ตามลำดับ [12]

2.6 คอนกรีต

เนื่องจากเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีหลากหลายคุณสมบัติ เช่น สามารถหล่อขึ้นรูปตามที่ต้องการได้ ผิวคอนกรีตสามารถตกแต่งได้และมีความคงทนสูงที่สำคัญคือ เมื่อเทียบคอนกรีตกับเหล็กรูปพรรณถือว่า มีราคาที่ถูก ส่วนผสมของคอนกรีตจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกจะเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำและสารผสมเพิ่ม ส่วนที่สองจะเรียกว่า มวลรวม (Aggregates) มวลรวมละเอียดหรือทรายและมวลรวมหยาบซึ่งก็คือ หินหรือกรวด ซึ่งซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชัน (Hydration) หากนำส่วนผสมเหล่านี้มาผสมกันจะได้คอนกรีตที่สามารถคงสภาพเหลวได้ในช่วงหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งคอนกรีตในสภาพนี้เรียกว่า คอนกรีตสด (Fresh concrete) ในเวลาต่อมาคอนกรีตจะแปรสภาพเป็นของแข็ง โดยที่ความแข็งแรงจะสูงขึ้นตามอายุที่มากขึ้น ซึ่งความแข็งแรงจะเริ่มคงที่หลังจากแข็งตัวแล้วประมาณ 28 วัน จึงสามารถนำไปใช้งานในการรับน้ำหนักได้ โดยที่จะเรียกคอนกรีตในสภาพนี้ว่า คอนกรีตแข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete) คุณสมบัติของคอนกรีตสามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพ สำหรับโครงสร้างคอนกรีตนั้นคุณสมบัติทั้งสองจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม สำหรับคุณสมบัติทั้ง 2 ลักษณะจะมีผลต่อกันและกันในทางปฏิบัติอยู่ดี สิ่งสำคัญในการผสมคอนกรีตให้ได้คุณสมบัติที่ดีนั้นมาจากการเลือกวัสดุและส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อให้คุณสมบัติของคอนกรีตตรงตามที่ต้องการแบบไว้สำหรับการนำไปใช้งาน [18]

2.6.1 ส่วนประกอบของคอนกรีต

2.6.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ทำหน้าที่ให้กำลังของคอนกรีต ปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ ส่งผลให้กลายเป็นของหนืดเหลว ซึ่งจะทำให้การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อตามรูปร่างที่ต้องการได้ง่ายขึ้น [12]

2.6.1.2 มวลรวม (Aggregates) คือ วัสดุที่จะนำไปผสมกับซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) เพื่อให้ได้เป็นคอนกรีต ซึ่งมวลรวมจะกระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีตและทำหน้าที่เป็นวัสดุเฉื่อย ช่วยลดการยิดหรือการหดตัวและให้ความทนทานกับคอนกรีต ในส่วนผสมของคอนกรีตจะมีมวลรวมอยู่โดยประมาณร้อยละ 75 ของปริมาตร จึงส่งผลทำให้มวลรวมมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของคอนกรีต มวลรวมประกอบด้วยมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregates) เช่น หินหรือกรวด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือค้ำงอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และมวลรวมละเอียด (Fine Aggregates) เช่น ทราย ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ได้ คุณสมบัติสำคัญของมวลรวมที่ต้องคำนึงถึง คือ ความแข็งแรง ความสะอาด และขนาดคละ [12]

2.6.1.3 น้ำ (Water) สำหรับคอนกรีตนั้น น้ำถือว่าเป็นส่วนผสมที่สำคัญ น้ำที่จะนำมาใช้ผสมคอนกรีตควรเป็นน้ำที่สะอาด เช่น น้ำประปา หากนำน้ำที่มีสารแปลกปลอมเจือปนอยู่มากมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตอาจจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่อระยะเวลาในการก่อตัว การหดตัว หรืออาจส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลง ตลอดระยะเวลาอายุการใช้งานของคอนกรีต [12]

2.6.1.4 สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) คือ สารเคมีที่เติมลงในส่วนผสมของกระบวนการผลิตคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้สามารถทำการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ เพิ่มความสามารถในการเทคอนกรีตมากขึ้น สารลดน้ำชนิดพิเศษสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม [12] ดังนี้

(1) ซัลโฟเนตเตดเมลามีนเฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Malamine Formaldehyde Condensates) [12]

(2) ซัลโฟเนตเตดแนฟธาไลน์เฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates) [12]

(3) สารลดน้ำพิเศษอื่น เช่น กรดซัลโฟนิคเอสเทอร์ (Sulfonic Acid Ester) คาร์โบไฮเดรตเอสเทอร์ (Carbohydrate Ester) โมดิฟายด์ ลิกโนซัลโฟเนต (Modified Lignosulfonates) และโพลีคาร์บอกซิลอีเธอร์ (Polycarboxyl Ether) [12]

การลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตคือหลักการทั่วไปในการออกแบบคอนกรีตที่มีกำลังสูง โดยไม่ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตหรือความสามารถในการเทลดลง หรือเกิดการแยกตัว เป็นเหตุทำให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อลดส่วนผสมของน้ำลง และเสริมเข้าลดยางคอนกรีต ซึ่งเข้าลดยางจะกระจายตัวในเนื้อของคอนกรีตและทำการแทรกซึมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมวลรวม ส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดความหนาแน่น เนื่องด้วยการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ที่ดีขึ้น การเติมสารลดน้ำพิเศษสามารถทำให้ลดปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตได้ คุณสมบัติซีเมนต์เพสต์มีความสม่ำเสมอและหนาแน่น จึงส่งผลให้คอนกรีตมีสมบัติโดยรวมดีขึ้น [12]

การใช้สารลดน้ำพิเศษยังเป็นที่นิยมในงานคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมเข้าลดยางสูง (High Volume Fly Ash) เพื่อเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง โดยที่ปริมาณอัตราส่วนผสมเข้าลดยางจะมากกว่าร้อยละ 50 ของปูนซีเมนต์และทำการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังที่ดี ซึ่งงานคอนกรีตที่มีส่วนผสมปริมาณเข้าลดยางสูงจะมีความทนทานอย่างมาก [12]

2.6.2 สมบัติเชิงกลของคอนกรีต (Mechanical Properties of Concrete)

2.6.2.1 กำลังรับแรงอัด (Compression Strength) สำหรับคอนกรีตการรับกำลังอัดถือว่าเป็นคุณสมบัติเชิงกลที่เด่นที่สุด ซึ่งมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อกำลังอัด ได้แก่ กำลังมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กำลังมวลรวมหยาบ และแรงยกคดเหนียวที่เกิดขึ้นระหว่างมอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ [18]

2.6.2.2 กำลังแรงดึง (Tensile Strength) คอนกรีตจัดเป็นวัสดุที่เปราะ สามารถรับกำลังอัดได้สูงแต่รับกำลังดึงได้น้อยประมาณร้อยละ 5-15 ของกำลังรับแรงอัด [18]

2.6.2.3 กำลังเฉือน (Shear Force) กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตจะมีค่าประมาณร้อยละ 15-25 ของกำลังรับแรงอัด ซึ่งอัตราส่วนของคอนกรีตจะส่งผลให้กับค่าความต้านทานของแรงเฉือน เช่นเดียวกับค่ากำลังอัดประลัย [18]

2.6.2.4 กำลังยึดเหนี่ยว (Bond Strength) กำลังยึดเหนี่ยว คือ การต้านทานการขยับตัวของเหล็กเสริมที่ถูกนำมาหล่อภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะเกิดการยึดติดกันส่งผลให้เกิดแรงต้านทาน ตามมาตรฐานการออกแบบค่าแรงยึดเหนี่ยวมักจะถูกกำหนดเป็นปริมาณร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีต และขนาดของเหล็กเสริมที่ถูกนำมาใช้ และยังขึ้นอยู่กับสารผสมเพิ่ม ประเภทของปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์อีกด้วย [18]

2.6.3 สมบัติด้านกายภาพของคอนกรีต (Physical Properties of Concrete)

2.6.3.1 การขยายตัวภายใต้อุณหภูมิ (Thermal Expansive) เมื่อวัสดุได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นและอาจทำให้รูปร่างเกิดการเปลี่ยนแปลงอีกด้วย เพราะฉะนั้น วัสดุส่วนใหญ่ที่ได้รับความร้อนมักจะเกิดการขยายตัวและจะเกิดการหดตัวเมื่อได้รับความเย็นหรือความเย็นจางหายไป (Coefficient of Thermal Expansion) ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.15 [18]

ตารางที่ 2.15 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนขนาดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

| ชนิดของวัสดุ | ค่าการเปลี่ยนแปลง | |
|----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| ซีเมนต์เพสต์ | 18-20 | $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ |
| คอนกรีต | 7.5-13 | $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ |
| มวลรวมหยาบ (Granite) | 7-9 | $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ |
| มวลรวมหยาบ (Basalt) | 6-8 | $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ |
| เหล็ก | 11-12 | $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ |

(บวร อิงศรางกูร ณ อยุธยา, 2557, น.5)

2.6.3.2 การนำอุณหภูมิ (Thermal Conductivity) สัมประสิทธิ์การเป็นตัวนำอุณหภูมิ (Coefficient of Thermal Conductivity, K) หมายถึง ความร้อนที่มีอัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอหนึ่งหน่วย ผ่านวัสดุที่มีความหนาหนึ่งหน่วย และมีพื้นที่หน้าตัดในแต่ละด้านเท่ากับหนึ่งหน่วย โดยที่ค่า K ของซีเมนต์จะอยู่ที่ประมาณ 1-1.5 W/m.K โดยที่มวลรวมหยาบหรือหินทั่วไปค่า K จะอยู่ที่ประมาณ 3 W/m.K ซึ่งตัวแปรหลายตัวจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ แต่ตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือความชื้น เนื่องจากปริมาณความชื้นที่สูงจะส่งผลให้ค่า K เพิ่มมากขึ้น [18]

2.6.4 ชนิดและประโยชน์ของคอนกรีต

งานคอนกรีตส่วนใหญ่ที่ทำเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถแยกออกเป็นงานแผ่นพื้น งานคอนกรีตทลหรืองานที่ต้องเข้าแบบได้ เช่น เสาอาคาร กำแพง เป็นต้น ช่องว่างที่จะเทคอนกรีตจะถูกกำจัดลงไป และหลังจากทำการถอดแบบแล้วจะต้องมีการแต่งผิว สำหรับผิวถนนและแผ่นพื้นไม่ต้องใช้แบบหล่อเพราะมีผิวหน้า แต่หลังจากที่ทำการเทคอนกรีตแล้วจะต้องทำการแต่งผิวและป้องกันผิวทันที ในงานคอนกรีตทล เช่น เขื่อน ตอม่อกลางน้ำหรือฐานราก มีผิวที่จะต้องใช่แบบหล่อเพียงน้อย แต่เนื่องด้วยปฏิกิริยาของซีเมนต์กับน้ำจะต้องคำนึงความร้อนที่จะเกิดขึ้น และการยึดเกาะระหว่างชั้นเทคอนกรีต [19]

2.7 คอนกรีตผสมเส้นใย

ถึงแม้ว่าคอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้ดี แต่ก็ถือว่ามีความเปราะ (Brittle Material) โดยทั่วไปมีคุณสมบัติในการรับกำลังดึงร้อยละ 10 ของการรับกำลังอัด [20] การเพิ่มความเหนียว (Ductility) ให้กับคอนกรีตนั้นจำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วนวัสดุเสริมกำลังเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต เส้นใยถือว่าเป็นวัสดุที่มีความนิยมในการนำมาผสมคอนกรีตเพื่อเป็นการเสริมคุณสมบัติดังกล่าว มีความคุ้นเคยในชื่อ คอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์ FRC (Fiber Reinforced Concrete) โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีเส้นใยเป็นส่วนผสมที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Discrete Fiber) เข้าไประหว่างการผสมทั้งเส้นใยไฟเบอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ใยหิน ฟางข้าว ป่าน ปอ เป็นต้น หรือเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยเซรามิก เส้นใยคาร์บอน เส้นใยโพลอน และเส้นใยโพลีโพรพิลีน เป็นต้น [20]

2.7.1 โครงสร้างของคอนกรีตผสมเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete; FRC)

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ซึ่งก็คือ

2.7.1.1 Matrix ได้แก่ มอร์ตาร์

2.7.1.2 Reinforced ได้แก่ เส้นใย

สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใย (Steel Fiber Reinforced Concrete; SFRC) ถือว่าเป็นวัสดุชนิดที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fibrous Composite Material) คือ เส้นใยที่ถูกนำมาเป็นอัตราส่วนผสมของคอนกรีตจะมีการกระจายตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอน [20]

2.7.2 หลักการทำงานของเส้นใย

เมื่อคอนกรีตได้รับแรงกระทำจนเกิดรอยแตกแล้ว เส้นใยที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตจะทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างช้าและยากขึ้น สำหรับคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีส่วนผสมของเส้นใยจะส่งผลให้การแตกร้าวนำไปสู่การวิบัติได้เร็วขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่เปราะ ในกรณีคอนกรีตที่มีส่วนผสมเส้นใย หากเกิดการแตกร้าวเมื่อไหร่เส้นใยจะทำการยึดรั้งรอยร้าวเพื่อไม่ให้เกิดการขยายตัวออกได้โดยง่ายหรืออาจหยุดรอยร้าวนั้นได้ทันที ซึ่งจะส่งผลให้เกิดรอยร้าวใหม่ โดยที่จะต้องมีการเพิ่มแรงเข้าไปในวัสดุชิ้นนั้น หากนำคอนกรีตผสมเส้นใยและคอนกรีตธรรมดามาพิจารณาจะพบเห็นรอยร้าวในคอนกรีตผสมเส้นใยมากกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งจำนวนรอยร้าวที่มากกว่าบ่งบอกถึงแรงกระทำที่มากกว่าเพื่อให้คอนกรีตผสมเส้นใยเกิดรอยร้าวใหม่ [20]

2.7.3 สมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใย

2.7.3.1 ความสามารถในการเท (Workability) ความสามารถในการเทคอนกรีตจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตผสมเส้นใยมาเปรียบเทียบกันพบว่า การใส่เส้นใยส่งผลให้การยุบตัวของคอนกรีตลดลง [18]

2.7.3.2 การรับแรงอัด (Compressive Strength) การนำเส้นใยมาผสมกับคอนกรีตไม่ได้มีวัตถุประสงค์หลักที่จะเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่ความสามารถในการรับกำลังอัดอาจเพิ่มขึ้นอย่างเล็กน้อยประมาณร้อยละ 10-25 หากนำเส้นใยมาผสมในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อยลง ซึ่งจะมีผลทำให้การรับกำลังอัดลดลง จึงทำให้การอัดแน่นยากขึ้น [18]

2.7.3.3 กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนหลังจากนำเส้นใยมาผสมลงในคอนกรีต เนื่องจากความเหนียวของเส้นใยทำให้กำลังรับแรงดึงมีค่ามากเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงดีกว่าคอนกรีตธรรมดา หากแรงดึงมากกระทำกับคอนกรีตจนเกิดการแตกร้าว เส้นใยจะทำหน้าที่ยับยั้งการขยายตัวของรอยแตกร้าวทันที การนำเส้นใยมาผสมกับคอนกรีตส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกำลังรับแรงดึงขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของเส้นใยเป็นอย่างมาก หากเส้นใยและแรงดึงอยู่ในแนวทิศทางเดียวกันกำลังรับแรงดึงอาจสูงถึงร้อยละ 133 สำหรับการผสมเส้นใยชนิดตรงในปริมาณร้อยละ 5 [18]

2.7.3.4 กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) เมื่อนำเส้นใยมาผสมกับคอนกรีตส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดมากกว่าการรับแรงอัดและการรับแรงดึง โดยที่ยังพบว่า ค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Aspect Ratio) และปริมาณเส้นใยส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 30-100 ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการรับแรงดึงและแรงดัด คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใย การเรียงตัวของเส้นใย รูปร่างของเส้นใย กำลังของซีเมนต์เพสต์ ชนิดของเส้นใย และปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการผสม เป็นต้น [18]

2.8 การบ่มตัวอย่างคอนกรีต

เป็นการบ่มเพื่อป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีตโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี ดังนี้

2.8.1 การบ่มในแบบหล่อ แบบหล่อไม้ที่เปียกชื้นและแบบหล่อเหล็ก มีความสามารถในการป้องกันมิให้ความชื้นระเหยออกได้ ถือว่าเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เพียงแค่ไม่ให้ผิวด้านบนของแท่งตัวอย่างขาดความชื้น และปล่อยให้แท่งตัวอย่างที่นำมาหล่อไว้ให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.8.2 การใช้กระดาษกันน้ำซึม กระดาษกันน้ำซึมนี้เป็นกระดาษ 2 ชั้น ซึ่งจะถูกนำมาทับผิวแท่งตัวอย่างให้สนิท มีการเสริมใยแก้วเพื่อความเหนียว และยางมะตอยเพื่อให้ยึดติดกัน มีคุณสมบัติในการยึดหรือหอดตัวที่ไม่มากนักหากมีความชื้นหรือแห้ง ข้อควรระวัง คือ รอยต่อระหว่างแผ่นจะต้องผนึกให้มีความแน่นด้วยกาวหรือเทป และกระดาษกันน้ำซึมห้ามมีรอยขาดหรือชำรุด

2.8.3 การใช้แผ่นผ้าพลาสติกหุ้ม วิธีการนี้มีความคล้ายคลึงการใช้กระดาษกันน้ำซึม แต่เนื่องด้วยแผ่นผ้ามีความเบามากกว่า จึงมีความสะดวกกว่าในการนำมาใช้งาน และสามารถใช้กับงานโครงสร้างได้ทุกชนิด ข้อควรระวัง คือ ให้ความแน่นระหว่างแผ่นผ้าพลาสติกหุ้ม ไม่ให้มีการฉีกขาดหรือชำรุด และเนื่องด้วยมีน้ำหนักที่เบา จึงต้องระมัดระวังในการผูกยึด

2.8.4 การใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต เป็นการพ่นสารเคมีลงบนผิวคอนกรีต ซึ่งสารเคมีที่พ่นนี้จะกลายเป็นเยื่อบางๆ สารเคมีนี้จะทำการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีตได้ แม้การบ่มด้วยวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงแต่ก็เพิ่มทั้งความสดวกและความรวดเร็วในการทำงาน จึงมักถูกนำไปใช้กับงานที่บ่มด้วยวิธีอื่นค่อนข้างลำบาก การพ่นสารเคมีนี้ต้องมีความทั่วถึงและต้องทำการพ่นตอนที่ผิวคอนกรีตยังมีความชื้น ข้อที่ควรทราบ สารเคมีนี้จะทำให้เกิดผลเสียระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตที่เทใหม่ จึงไม่ควรนำไปใช้กับงานคอนกรีตที่มีการต่อเติม หรือฉาบปูนในภายหลัง และไม่ควรถ่ายการฉีบน้ำซ้ำหากทำการพ่นสารเคมีนี้ไปแล้ว เนื่องจาก จะเป็นการชะล้างสารเคมีออก

2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว

2.9.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ASTM C39 [1]

การเสริมเส้นใยมะพร้าวไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังอัดโดยตรง แต่อาจทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หากใช้ปริมาณเส้นใยมะพร้าวมากเกินไปจะส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่มากเกินไป ทำให้ค่าการยุบตัวของซีเมนต์เพสต์ลดลง ส่งผลให้เกิดความยากในการอัดแน่น การทดสอบทำโดยการนำแท่นตัวอย่างคานที่มีหน้าตัด 10×10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร มาตัดให้มีขนาดหน้าตัด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร สำหรับกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะคิดเป็นหน่วยน้ำหนักกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กก./ตร.ซม.) ในการวางตัวอย่างทดสอบบนเครื่องกดมีขั้นตอนดังนี้

2.9.1.1 การวางตัวอย่างทดสอบบนเครื่องกดปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

- (1) ด้านของผิวเหล็กที่สัมผัสกับตัวอย่างทดสอบต้องสะอาดปราศจากน้ำมัน
- (2) แผ่นเหล็กบนและแผ่นเหล็กล่างจะต้องมีศูนย์กลางที่ตรงกัน
- (3) แกนของแท่งตัวอย่างทดสอบต้องตรงกับศูนย์กลางของเครื่องทดสอบ
- (4) ผิวแผ่นเหล็กและตัวอย่างทดสอบจะต้องสัมผัสกันอย่างแน่นสนิท

2.9.1.2 เมื่อได้ปฏิบัติตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว จึงเริ่มทำการให้น้ำหนักกดอย่างสม่ำเสมอ จนกว่าจะถึงจุดคราก (Yield Point) หรือเกิดการวิบัติ (Failure) กับตัวอย่างทดสอบ

2.9.1.3 เมื่อการทดลองสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด และทำการบันทึกสัญลักษณ์การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 2.1 การทดสอบแรงอัด (Compressive Strength)

คำนวณหาหน่วยแรงอัดเฉลี่ยได้จากสมการ (2.4)

$$\sigma_c = P/A \quad (2.4)$$

เมื่อ σ_c = หน่วยแรงอัด (กก./ตร.ซม.)

P = แรงอัดสูงสุด (กก.)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ (ตร.ซม.)

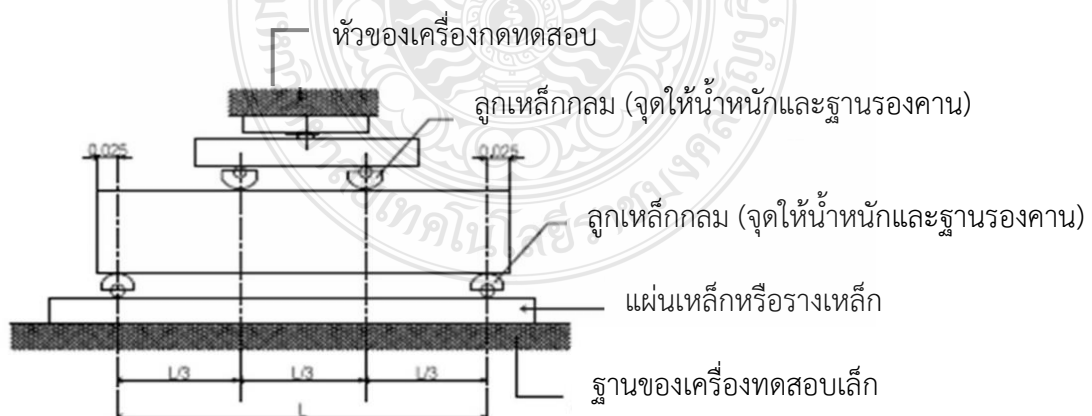
2.9.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Test) ASTM C78

การทดสอบแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Test) การจัดวางน้ำหนักให้มากระทำบนคานคอนกรีตในที่นี้คือการกล่าวถึงวิธีทดสอบโดยให้น้ำหนักกด 2 จุด เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถทำการหาการต้านทานแรงดึงของคอนกรีตได้ ในลักษณะแรงดึงภายใต้การให้น้ำหนักกดดัด รูปร่าง (Dimension) ความหยาบของผิววัสดุรวมรวมจะส่งผลให้กับแรงดึงที่เกิดจากการดัด สำหรับกำลังแรงดึงของชิ้นส่วนตัวอย่างที่นำมาทดลองจะคิดเป็นหน่วยน้ำหนักกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กก./ตร.ซม.) ในการวางคานตัวอย่างทดสอบบนเครื่องกดมีขั้นตอนดังนี้

2.9.2.1 นำแท่งคานตัวอย่างทดสอบมาวางบนฐานรองรับ จัดตำแหน่งหัวของเครื่องกดทดสอบและจุดรองรับให้ตรงตามจุดที่ได้กำหนดไว้ โดยทำการทดสอบด้วยการให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับทั้ง 2 จุดตามภาพที่ 2.2

2.9.2.2 เมื่อได้ปฏิบัติตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว จึงเริ่มทำการให้น้ำหนักกดอย่างสม่ำเสมอ จนกว่าจะถึงจุดคราก (Yield Point) หรือเกิดการวิบัติ (Failure) กับแท่งคานตัวอย่างทดสอบ

2.9.2.3 เมื่อการทดลองสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด และทำการบันทึกรูปลักษณะการวิบัติของแท่งคานตัวอย่างทดลอง



รูปที่ 2.2 การทดสอบแรงดัด (Flexural Strength)

การหาค่ากำลังตัดของคานคอนกรีต โดยปกติจะหาในรูปแบบของ Modulus of Rupture; R ซึ่งมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.5

$$R = M.c/I \quad (2.5)$$

เมื่อ R = หน่วยแรงตัด (Modulus of Rupture), (นิวตัน/ตร.ม
M ม.)

C = ค่าโมเมนต์สูงสุดที่หน้าตัด, (นิวตัน-ตร.มม.)

I = ความเฉื่อยของพื้นที่, (mm^4)

= ระยะจาก Neutral Axis ถึงผิวนอกของคาน, (ซม.)

จากสมการ สามารถเขียนในรูปของแรงกระทำ (Load; P) กับมิติต่างๆ ของคานคอนกรีต สำหรับวิธี Third-point loading และคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมได้ คือ

ถ้ารอยร้าวอยู่ในส่วนกลางของสามส่วนของช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับ (Span Length) ซึ่งมีค่าดังสมการ 2.6

$$R = P.L/(b.d)^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ P = แรงกดสูงสุด (ผลรวมของแรงกดทั้งสอง) ซึ่งดูได้จาก Testing machine, (นิวตัน)

L = ช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับ Span Length, (ซม.)

B = ความกว้างของคาน, (ซม)

d = ความลึกของคาน, (ซม)

หมายเหตุ 1) ไม่ได้รวมน้ำหนักของคานคอนกรีตในสมการข้างต้น

2) ถ้ารอยแตกร้าวอยู่นอกส่วนกลางของสามส่วนของช่วง Span length โดยไม่เกินร้อยละ 5 ของ Span length ให้คำนวณค่า Modulus of ดึงสมการที่ 2.7

$$R = 3(P.a)/(b.d)^2 \quad (2.7)$$

โดยที่ a = ระยะทางเฉลี่ยระหว่างรอยแตกกับจุดรองรับที่ใกล้ที่สุด, (มม.) ถ้ารอยแตกร้าวอยู่นอกส่วนกลางของสามส่วนของช่วง Span Length มากกว่าร้อยละ 5 ของ Span Length ให้ถือว่าผลการทดสอบนี้ ใช้ไม่ได้

2.9.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength) การทดสอบแรงดึงนี้ ได้มาจากการพัฒนาเครื่องมือของ วิโรจน์ โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของ วัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกนโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.9.3.1 การนำตัวอย่างทดสอบไปประกอบบนเครื่องกดปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

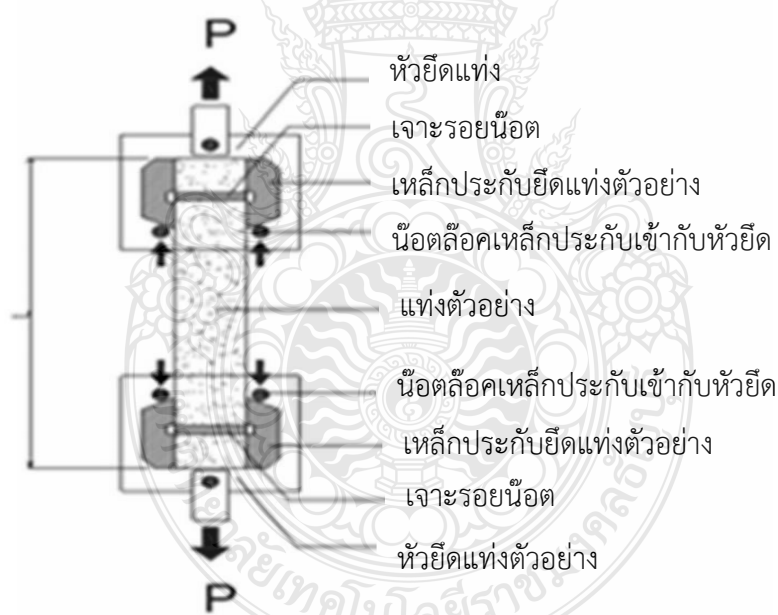
- (1) ตรวจสอบชุดป้องกันความปลอดภัย เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง
- (2) ทำการเจาะรูใส่น็อตเพื่อเป็นการยึดขึ้นอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ
- (3) นำตัวอย่างทดสอบมาประกอบกับเครื่องทดสอบ จัดชิ้นส่วนทดสอบให้

อยู่ในแนวตั้งตรงตลอดระยะเวลาการทดสอบ

(4) ตั้งค่ามาตราวัดให้เป็นศูนย์ และออกแรงดึงเล็กน้อยเพื่อให้เกิดความตึง ระหว่างตัวอย่างทดสอบกับเครื่องทดสอบตามภาพที่ 2.3

2.9.3.2 เมื่อได้ปฏิบัติตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว จึงเริ่มทำการทดสอบโดยการให้ เครื่องทดสอบทำการออกแรงดึงอย่างสม่ำเสมอ จนกว่าจะเกิดการวิบัติ (Failure) กับตัวอย่างทดสอบ

2.9.3.3 เมื่อการทดลองสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าของหน่วยแรงดึงสูงสุด และทำการบันทึกรูปลักษณะการวิบัติของแท่นคานตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 2.3 การทดสอบแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength)

ค่าแรงดึงโดยตรงของแท่งตัวอย่าง สามารถหาหน่วยแรงดึงได้จากสมการ (2.8)

$$\sigma_t = P/A \quad (2.8)$$

เมื่อ σ_t = หน่วยแรงดึงโดยตรง (กก./ตร.ซม.)

P = แรงดึงสูงสุด (กก.)

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งทดสอบ (ตร.ซม.)

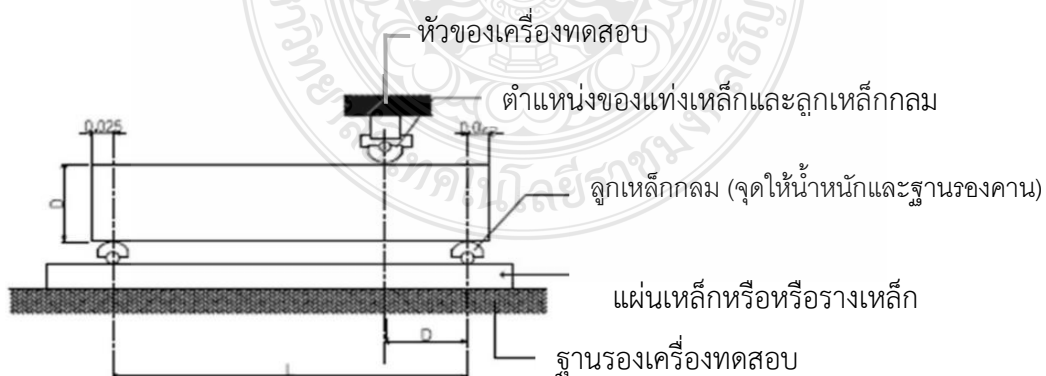
2.9.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shearing Test)

แรงเฉือน คือ แรงกระทำที่มีทิศทางขนานกับพื้นที่รับแรง ซึ่งแรงเฉือนตรงสามารถแยกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ แรงเฉือนเดี่ยว (Single Shear) และแรงเฉือนคู่ (Double Shear) โดยแรงที่เกิดขึ้นตลอดแนวระนาบเดียว คือ แรงเดี่ยว ส่วนแรงที่เกิดขึ้นระหว่างสองระนาบในเวลาเดียวกัน คือ แรงเฉือนคู่ ซึ่งความสามารถในการรับกำลังแรงเฉือนระหว่างแรงเฉือนเดี่ยวกับแรงเฉือนคู่ควรเท่ากัน แต่เนื่องด้วยการดัดองจึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน เลยอาจทำให้ความสามารถในการรับกำลังแรงเฉือนไม่เท่ากันเสมอไป สำหรับกำลังแรงเฉือนของแท่งคานตัวอย่างที่นำมาทดลองจะคิดเป็นหน่วยน้ำหนัก กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กก./ตร.ซม.) การวางตัวอย่างทดสอบบนเครื่องกดปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

2.9.4.1 นำแท่งคานตัวอย่างทดสอบมาวางบนฐานรองรับ จัดตำแหน่งหัวของเครื่องทดสอบและจตุรรองรับให้ตรงตามจุดที่ได้กำหนดไว้ โดยทำการทดลองด้วยการให้แรงกดที่ระยะ D ตามภาพที่ 2.4

2.9.4.2 เมื่อได้ปฏิบัติตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว จึงเริ่มทำการให้น้ำหนักกดอย่างสม่ำเสมอ จนกว่าจะถึงจุดคราก (Yield Point) หรือเกิดการวิบัติ (Failure) กับแท่งคานตัวอย่างทดสอบ

2.9.4.3 เมื่อการทดลองสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด และทำการบันทึกที่รูปลักษณะการวิบัติของแท่งคานตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 2.4 การทดสอบแรงเฉือน (Shear Strength)

ค่าของกำลังรับแรงเฉือนคำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$\tau = P(L-D)/L.b.d \quad (2.9)$$

เมื่อ τ = หน่วยแรงเฉือน, (กก./ตร.ซม.)

P = นำหนักกระทำ, (กก.)

L = ช่วงระยะช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับ, (ซม.)

b = ความกว้างของคาน, (ซม.)

d = ความลึกของคาน, (ซม.)

D = ระยะห่างจากฐานรองรับถึงแนวแรงกระทำด้านที่ใกล้กว่า, (ซม.)

2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พัชร ออนพรม [1] ได้ทำการศึกษาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายบางส่วน โดยประยุกต์จากกระบวนการผลิตแบบโฟมคอนกรีตกับแบบมวลรวมเบา โดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตอทรายในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณโฟมในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร ใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรของทราย ทำการควบคุมค่าการไหลให้อยู่ระหว่างร้อยละ 45 ± 5 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน แลวนำผลการทดสอบไปสร้างแบบจำลองโดยใช้สมการถดถอยแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยคำนวณผ่านค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย (R^2) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) และร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (MAPE) นอกจากนี้ ทำการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของคอนกรีตมวลเบาโดยการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS จากผลการทดลองพบว่า การใช้เถ้าแกลบเป็นมวลรวมละเอียดทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีน้ำหนักน้อยลง โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายคือ ปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตร ซึ่งให้กำลังอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 22 กก./ซม.² 954 กก./ม.³ และร้อยละ 28 ตามลำดับ นอกจากนี้อนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลเบา ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายไม่มีผลกระทบต่อฟองอากาศแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี สามารถสรุปได้ว่า เถ้าแกลบสามารถใช้แทนที่ทรายในปริมาณที่เหมาะสมในคอนกรีตมวลเบาได้แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้นให้ความเที่ยงตรงและแม่นยำมากกว่าการถดถอยพหุคูณแบบเชิงเส้น ซึ่งให้ค่า R^2 ของกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ เท่ากับ 0.978, 0.966 และ 0.987 ตามลำดับ อีกทั้งมีค่าความแปรปรวนระหว่างข้อมูลแต่ละชุดต่ำกว่า คือ RMS และ MAPE ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบเชิงเส้น

วิเชียร ชาลี [2] ได้ทำการศึกษาผลของความละเอียดของแก้วกลบ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากแก้วกลบดำผสมแก้วถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแก้วถ่านหินต่อแก้วกลบดำเท่ากับ 9:1 โดยน้ำหนัก ใช้แก้วกลบดำที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ แก้วกลบดำไม่บด (O) แก้วกลบดำบดหยาบ (M) และแก้วกลบดำบดละเอียด (F) ซึ่งมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34 และ 30 ตามลำดับ ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/S) เท่ากับ 0.90 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม. แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และบ่มตัวอย่างในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบ ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความละเอียดของแก้วกลบดำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบที่ใช้แก้วกลบดำบดละเอียดมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้แก้วกลบดำไม่บดอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉลี่ยถึงร้อยละ 60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นในช่วง 12 - 16 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีกำลังอัดสูงสุดที่ความเข้มข้น 16 โมลาร์ และกำลังอัดลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเท่ากับ 18 โมลาร์ นอกจากนี้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้นตามอายุทดสอบและมีแนวโน้มการพัฒนาที่สูงในช่วงอายุต้น

ชาคริต โยสอาด และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการใช้แก้วกลบเป็นวัสดุบ่มภายในมอร์ตาร์ เนื่องจากแก้วกลบมีความพรุน ซึ่งอนุภาคแก้วกลบสามารถกักเก็บน้ำไว้ในตัวเองได้จึงเป็นไปได้ที่จะสามารถช่วยคายน้ำออกมาเพื่อให้เกิดการบ่มภายในได้ งานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2 โดยน้ำหนัก ใช้แก้วกลบแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของทราย ใช้แก้วลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทำการผสมและหล่อมอร์ตาร์โดยควบคุมการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105 ถึง 115 โดยใช้สารลดน้ำช่วย บ่มมอร์ตาร์ในน้ำและบ่มโดยการห่อหุ้มด้วยพลาสติก ทดสอบหากลำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน นอกจากนี้ยังทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดและความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณแก้วกลบที่ใช้แทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้แก้วกลบในส่วนผสมมอร์ตาร์ส่งผลให้มอร์ตาร์มีความพรุนมากขึ้น การใช้แก้วลอยสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ทั้งที่ใช้และไม่ใช้แก้วกลบแทนที่ทรายได้

วิโรจน์ ไกรเทพ และจตุพล ตั้งปกาศิต [4] ได้ทำการศึกษาศักยภาพในการนำเส้นใยมะพร้าวมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทำการศึกษาการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเส้นใยมะพร้าว โดยทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงผ่าซีก กำลังรับแรงดึงโดยตรง และกำลังรับแรงเฉือน ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ตัวอย่างคานขนาด $10 \times 10 \times 60$ เซนติเมตร และตัวอย่างคานขนาด $10 \times 10 \times 30$ เซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กก.) เส้นใยมะพร้าว : วัสดุประสาน : น้ำ จำนวน 3 อัตราส่วนผสม คือ 0.9 : 6.0 : 3.8, 1.0 : 6.0 : 3.9 และ 1.1 : 6.0 : 4.0 ผสมให้เข้ากันแล้วนำมาอัดขึ้นรูปและบ่มทิ้งไว้โดยวิธีหุ้มด้วย

จากก้านมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวจะให้ค่าสูงกว่ากรณีเสริมแรงด้วยเส้นใยจากก้ามมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว

พงศธร กองแก้ว และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมชีวภาพเสริมแรงด้วย เส้นใยรากหญ้าแฝกผสม เส้นใยมะพร้าว และผสมเส้นใยเปลือกถั่วลิสงในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมชีวภาพ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยรากหญ้าแฝกผสมเส้นใยมะพร้าว (C1) และเส้นใยรากหญ้าแฝกผสมเส้นใยเปลือกถั่วลิสง (C2) และ 2) ศึกษาสมบัติเชิงกลได้แก่ ความทนแรงดึง มอดูลัสแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง มอดูลัสแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทก โดยวางแผนการทดลองแบบ 2x5 Factorial ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ใช้จำนวน 3 ซ้ำ ผลการทดลองพบว่า วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยรากหญ้าแฝกผสมเปลือกถั่วลิสง (C2) ที่อัตราส่วน 1:1 มีค่าความทนแรงดึง มอดูลัสแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง และมอดูลัสแรงดัดโค้งสูงสุด เท่ากับ 28.72 MPa 918.00 MPa 30.38 MPa และ 911.16 MPa ตามลำดับ ส่วนสมบัติความทนแรงกระแทกสูงสุด เท่ากับ 8.51 kJ/m² ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยรากหญ้าแฝกผสมเส้นใยมะพร้าว (C1) ที่อัตราส่วน 5:5 และจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคพบว่า สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะภายในที่ยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เกิดขึ้นได้ดี และความเครียดแรงดึงสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับและกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของวัสดุผสม นอกจากนี้การเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมมีค่าลดลง

วัชรินทร์ แซ่หลาย [8] ได้ทำการศึกษาผลของเส้นใยเซลลูโลสและผงเส้นใยเซลลูโลสจากฝ้ายดิบและเส้นใยมะพร้าวต่อสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเตรียมโพลีด้วยกระบวนการอัดร้อนที่ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก และปริมาณผงเส้นใยเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างเซลล์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ผลการวิจัยพบว่า โพลีทุกตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นสัมพันธ์ใกล้เคียงกันและจากการตรวจสอบโครงสร้างเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีจำนวนเซลล์แบบเปิดเพิ่มขึ้นและขนาดของเซลล์ใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น สำหรับเส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสที่มีปริมาณเท่ากันพบว่า โพลีที่ผสมผงเส้นใยมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าโพลีที่ผสมเส้นใย เนื่องจากผงเส้นใยกระจายตัวในเนื้อโพลีได้ดีกว่าเส้นใย ในขณะที่เดียวกัน โพลีที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบมีจำนวนเซลล์แบบเปิดมากกว่าและขนาดของเซลล์ใหญ่กว่าโพลีที่ผสมเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าว โดยเส้นใยและผงเส้นใยมะพร้าวมีการกระจายตัวในเนื้อโพลีได้ดีกว่าเส้นใยและผงเส้นใยฝ้ายดิบ นอกจากนี้ยังพบว่า เส้นใยและผงเส้นใยเซลลูโลสทั้งสองชนิดจัดตัวแยกเฟสออกจากเนื้อโพลีพลาสติก ในการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยหรือผงเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงดึง ค่าความทนแรงกด และค่าความสามารถในการคืนตัวมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการคืบมีค่าสูงขึ้น

สุชีพ ศรีชู และ จตุพล ตั้งปกาศิต [9] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของมอร์ตาร์ ด้านกำลังอัด และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน โดยใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลของ บริษัท เอ.ที.ไปโอ

เพาเวอร์ จำกัด จ.พิจิตร มี 2 ขนาด คือ เถ้าแกลบไม่บดกับเถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ผลการศึกษาพบว่า เถ้าแกลบบดละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้สูง มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่มีการแทนที่ร้อยละ 10 ทั้งกรณีที่กำหนดค่าการไหลคงที่และที่กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ มีกำลังอัด สูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน สำหรับคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมาตรฐานมีค่าสูงกว่าการหล่อแบบธรรมดาร้อยละ 48 สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบไม่บด และคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) ซึ่งการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าในปริมาณแทนที่ร้อยละ 10 และยังพบอีกว่าการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันจะทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตลดลงโดยที่การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 สามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บดและคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P)

เอกสิทธิ์ ศิริสุรวงศ์ [10] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ เป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อพัฒนาจีโอพอลิเมอร์ โดยการใช้ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตถูกใช้เป็นสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา ผลของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 3 เท่าตัว ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา คือ 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการบ่มจะส่งผลให้ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง สภาวะที่เหมาะสมในการทดแทนดินตะกอนประปาด้วยเถ้าแกลบคือร้อยละ 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องและ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ การเพิ่มปริมาณ เถ้าแกลบจะส่งผลให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ลดลงเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง และการเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบส่งผลให้หน่วงเวลาในการก่อตัว

วิเชียร ชาลี [11] ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตบดลือคจากวัสดุประสานจากเถ้าแกลบ (RHA) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นสารเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตบดลือคจากเถ้าแกลบ ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก วัสดุประสานและใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวม โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อหินฝุ่นเท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก เตรียมคอนกรีตบดลือคจากเถ้าแกลบโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวา-แรม หลังจากนั้นบ่มคอนกรีตบดลือคในอากาศที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ โดยทดสอบกำลังอัดของจากคอนกรีตบดลือคจากเถ้าแกลบที่อายุ 7, 14

และ 28 วัน ตลอดจนทดสอบการ ดูดซึมน้ำในคอนกรีตบล็อกที่อายุทดสอบ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงไม่เกิน 0.5 โมลาร์ มีผลให้คอนกรีตบล็อกมีกำลังสูงขึ้น อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงขึ้นไปเป็น 0.75 โมลาร์ การใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ร้อยละการดูดซึมน้ำในคอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดที่ลดลง

ปณิธิ เปรมสัจธรรม [12] ได้ทำการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต และ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเบื้องต้นในเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลาย ตามมาตรฐาน USEPA method 3051 พบว่า เถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีเท่ากับ 0.13 0.04 0.03 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เถ้าลอยบิทูมินัสมีปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่วและสังกะสีเท่ากับ 0.01 0.01 0.01 และ 0.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 method 1311 พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณโลหะหนักสูงกว่าเถ้าลอยบิทูมินัส โดยพบโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วในเถ้าลอยลิกไนต์สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด (3.54 1.95 และ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ยกเว้นสังกะสีต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด (4.55 มิลลิกรัมต่อลิตร) และพบว่าพีเอชมีผลต่อการชะละลายโลหะหนักในเถ้าลอย กล่าวคือ อาร์เซนิกและตะกั่วถูกชะละลายเพิ่มขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 4 ถึง 8 และต่ำลงที่พีเอชเท่ากับ 10 ในขณะที่โครเมียมและสังกะสีถูกชะละลายต่ำลงที่พีเอชเท่ากับ 4 ถึง 8 และเพิ่มขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 10 และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักหลังจากขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้วพบว่า คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถตรึงโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีที่มีในเถ้าลอยได้ สำหรับการออกแบบส่วนผสม พบว่า สามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้ตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 60 โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 4.30 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมดและสามารถใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุป่อซโซลานร่วมกับสารละลายต่างในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้ โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 13.67 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด สามารถรับแรงอัดได้ 230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

วันชัย สะตะและ คณะ [13] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง โดยการนำมาบดให้มีความละเอียดจนค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 2 จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 30 ให้กำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 100 ถึง 113 โดยการแทนที่ร้อยละ 20 มีแนวโน้มให้กำลังอัดสูงสุด เมื่อคอนกรีตอายุ 90 วัน การแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราร้อยละ 20 ให้กำลังอัดสูงถึง 959 กก/ซม² โดยคิดเป็นร้อยละ 110 ของคอนกรีตควบคุมหรือคิดเป็นร้อยละ 98 ของคอนกรีตที่แทนที่ด้วย

ซิลิกาพุ่มควบแน่นร้อยละ 10 นอกจากนี้การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มเทียบเท่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยซิลิกาพุ่มควบแน่นร้อยละ 10 เมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 90 วัน

สุรเชษฐ วรรณ [14] ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดประลัยของคอนกรีตอย่างมอรรตารที่มี ส่วนผสมของเถ้าแกลบ โดยนำมาบด 2 ขนาดคือ บด 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมงตามลำดับ โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 และ 50 ก่อนตัวอย่างมอรรตารที่ใช้ในการทดลองใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จากผลการวิจัยพบว่า ที่ก่อนตัวอย่างมอรรตารที่อายุ 90 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมงร้อยละ 25 (M70RHA-4-25) ให้กำลังอัดประลัยสูงสุดเท่ากับ 298.88 กก./ตร.ซม. และก่อนตัวอย่างมอรรตาร (M50RHA-4-50) ค่ากำลังอัดประลัยน้อยที่สุดเท่ากับ 257.06 กก./ตร.ซม. นอกจากนี้พบว่า การแทนที่ร้อยละ 25 ของเถ้าแกลบบดที่ 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมงสามารถผ่านข้อกำหนดการใช้วัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 แต่การแทนที่ร้อยละ 50 ของเถ้าแกลบบดที่ 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมงไม่สามารถผ่านข้อกำหนดการใช้วัสดุปอซโซลานตาม มาตรฐาน ASTM C 618

ประชุม คำพุ่ม และว่าที่ร้อยตรีกิตติพงษ์ สุวิโร [15] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบที่ไม่เสริมแผ่นยางพาราและเสริมแผ่นยางพารา โดย ทำการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ $H/C=0.63$, $H/C=1.23$, $H/C=1.83$, $H/C=2.43$ และ $H/C=3.03$ ตามลำดับ ทำการขึ้นรูปตัวอย่างคอนกรีตบล็อก ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาด $190 \times 390 \times 70$ มิลลิเมตร เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของก่อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบ คือ อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ $H/C=1.83$ และขั้นตอนที่ 2 นำอัตราส่วนที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 1 ($H/C = 1.83$) มาทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบปกติและคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบเสริมแผ่นยางพารา โดยทำการทดสอบความหนาแน่น, การดูดซึมน้ำ, การเปลี่ยนแปลงความยาวและความต้านทานแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.58-2530 เรื่องคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักพบว่า คอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบเสริมแผ่นยางพารามีค่าความหนาแน่นการดูดซึมน้ำและความต้านทานแรงอัด ใกล้เคียงกับคอนกรีตบล็อกมวลเบาที่ไม่เสริมแผ่นยางพารา การเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบเสริมแผ่นยางพารามีค่าน้อยกว่าและสามารถลดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบได้ต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบาที่ไม่เสริมแผ่นยางพาราอยู่ประมาณ 1 องศาเซลเซียส

นิตยา นาน้ำเขียว และชัยวัฒน์ แสงเขียว [16] ได้ทำการทดลองนำเส้นใยผักตบชวามาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงดึงและแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต โดยเปลี่ยนส่วนผสมตามความเหมาะสมคือเส้นใยผักตบชวาใช้ในการผสมคอนกรีตโดยอัตราส่วน น้ำ : ซีเมนต์ โดยน้ำหนัก เป็น 0.6 ความยาวเส้นใยผักตบชวาขนาด 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร ผสมในสัดส่วนต่างๆ กัน ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ใช้คือปูน 1 ส่วน ททราย 2 ส่วนโดยน้ำหนัก แล้วจึงนำมาหล่อลงแบบรูปปริโคทและรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นได้ทำการบ่มคอนกรีตที่อยู่ในแบบหล่อเป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน แล้วจึงนำลูกปูนที่ได้จากการบ่มนั้นมาทดสอบหาความสามารถในการรับแรงดึงโดยเครื่องทดสอบแรงดึงพบว่า ความยาวเส้นใยขนาด 0.5 เซนติเมตร ที่ส่วนผสมปูน ททราย เส้นใย โดยน้ำหนัก มี

กำลังดึงเพิ่มขึ้นดีที่สุดเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 13.2 น้ำหนักลูกปูนผสม ผักตบชวาลดลงประมาณร้อยละ 20 ถึง 40

วรรณช ดีละมัน และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของอิฐบล็อกมวลเบาที่ผสมเส้นใยกล้วย เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองกรณีคือ ใช้เส้นใยกล้วยเป็นวัสดุผสมทดแทนปูนซีเมนต์ และทดแทนทรายในระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า อิฐบล็อกที่ผสมเส้นใยกล้วยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 2.5 มีค่าความหนาแน่นและค่าการต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 1,376 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 65.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ผลค่าการดูดซึมน้ำและการเปลี่ยนแปลงความยาวมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยกล้วยร้อยละ 7.5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 32.86 และร้อยละ 0.12 ตามลำดับ ดังนั้นอิฐบล็อกมวลเบาผสมเส้นใยกล้วยซึ่งมีอัตราส่วนร้อยละระหว่าง ทราย : ปูนซีเมนต์ : ปูนขาว : ยิปซัม : ผงอลูมิเนียม : เส้นใยกล้วย คือ 50 : 27.5 : 9 : 9 : 2 : 2.5 จึงมีสมบัติที่ต้านทานแรงอัดได้ดี เมื่อนำผลการทดสอบไปเทียบกับมาตรฐาน มอก.1505-2541 พบว่า มีค่าอยู่ในช่วงที่ มอก.กำหนดไว้ การนำเส้นใยกล้วยจึงเป็นอีกแนวทางที่มีความน่าสนใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงแทนการใช้วัสดุผสมที่ต้องนำมาจากทรัพยากรธรรมชาติโดยตรง

ผศ.ดร.บวร อิงศรากร ญ อยุธยา [18] ได้ทำการศึกษาทางพฤติกรรมการรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเพอร์ไลต์และเส้นใยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตจะประกอบด้วยคอนกรีตผสมเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์ ชนิดเส้นใยโพลีพรอพิลีน (PPFRC) โดยจะผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตร และผสมเพอร์ไลต์ทดแทนทราย ที่ปริมาณร้อยละ 15, 20 และ 30 โดยหล่อเป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 10×20 เซนติเมตร แล้วทำการบ่มด้วยความดันที่ 10 บาร์และไอน้ำ ณ อุณหภูมิที่ 200°C จึงนำคอนกรีตไปเผาที่อุณหภูมิ 100°C, 200°C, 400°C, 800°C และ 1000°C ตามมาตรฐาน ISO/TR834 ก่อนที่นำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและ ดึงแบบผ่าซีก ผลการทดสอบพบว่า การนำเส้นใยมาผสมกับคอนกรีตที่ผสมเพอร์ไลต์ทดแทนทรายละเอียดยิ่งส่งผลต่อคุณสมบัติการรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยและสภาวะอุณหภูมิที่คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์นั้นได้รับ โดยหลังการเผาที่อุณหภูมิ 100°C ส่งผลให้คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์และเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400°C พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกนั้นลดลงอย่างรุนแรงในทุกส่วนผสม (เพอร์ไลต์และเส้นใยสังเคราะห์ เพอร์ไลต์ และเส้นใยสังเคราะห์)

นิรุช สุขสมเขตร [19] ได้มีความสนใจทดลองนำเส้นใยมะพร้าวมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงดึงและแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต โดยเปลี่ยนส่วนผสมตามความเหมาะสมและคำนึงถึงการลดต้นทุนในการผลิต การทดลองนี้ได้มีการนำวัสดุคือเส้นใยมะพร้าวมาใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อตรวจสอบน้ำหนักของคอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งพบว่า มีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตธรรมดา สามารถรับแรงอัดได้ประมาณ 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการบ่มที่ 7 วัน ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ ปูน 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน โดยน้ำหนัก ในการตรวจสอบการดูดซึมน้ำและการดูความชื้นจะทำให้เป็นแผ่นขนาด 15×15 ตารางเซนติเมตร เพื่อที่จะสามารถนำเข้าไปอบและทำการ

ทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับใช้งานทางด้านวิศวกรรมต่อไป ในการนำอัตราส่วนผสมไปใช้งาน ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของคอนกรีตและความประหยัด

ประพนธ์ เฟื่องฟู 20] ได้มีความสนใจในการศึกษาพฤติกรรมและการต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเส้นใย ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ตัวอย่างคานทดสอบขนาด $10 \times 10 \times 50$ เซนติเมตร และเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายในปริมาณร้อยละ 0.5, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ทำการทดสอบแรงกระแทกด้วยวิธีต้อน้ำหนัก ด้วยเครื่องมือทดสอบที่ได้พัฒนาและสร้างขึ้นใหม่ โดยใช้ต้อน้ำหนัก 4.54 กิโลกรัม และ 9.09 กิโลกรัม ที่ระยะตกกระทบ 45.7 เซนติเมตร ทำการบันทึกค่าจำนวนครั้งที่ทำให้คอนกรีตตัวอย่างเกิดรอยร้าวครั้งแรกและที่วิบัติ ทำการวัดค่าระยะโก่งตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะ (Δ) เมื่อเริ่มเกิดรอยร้าว นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาพลังงานกระแทกและระยะโก่งตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่เท่ากันแต่ค่อยๆ กระทำ ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงอัด รับแรงดึงแบบผ่าซีก และรับแรงดัดได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับจำนวนครั้งจากการกระแทกได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาถึง 9 เท่า พลังงานกระแทกที่ทำให้คอนกรีตเกิดรอยร้าวครั้งแรกและเกิดการวิบัติมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าระยะโก่งตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะ (Δ) และน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆ กระทำมีค่าลดลง

จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ได้กล่าวมา ได้มีการใช้เส้นใยชนิดต่าง ๆ มาพัฒนาใช้ในงานคอนกรีตกันมากขึ้น โดยเส้นใยมะพร้าวก็เป็นอีกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้ให้เกิดเป็นประโยชน์ต่างๆ ได้ แต่ก็ยังไม่มีการพัฒนาจนสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เส้นใยมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการนำเส้นใยมะพร้าวมาพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งเป็นตลาดที่มีขนาดใหญ่และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีความต้องการนำมาใช้งานในปริมาณที่สูง โดยในการวิจัยครั้งนี้เส้นใยมะพร้าวร่วมกับวัสดุประสานเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดในการทดสอบสมบัติมอร์ตาร์และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว ซึ่งครอบคลุมไปถึง วัสดุที่ใช้ สัดส่วนผสม และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดลอง

3.1 การสำรวจและจัดหาวัตถุดิบ

3.1.1 วัสดุที่นำมาศึกษาและทดลองในงานวิจัยมี 2 ชนิด ได้แก่

3.1.1.1 เส้นใยมะพร้าว

3.1.1.2 เถ้าแกลบ

3.1.2 ศึกษาชนิดและสมบัติวัสดุประสาน

3.1.2.1 ในงานวิจัยเรื่องนี้ได้นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาใช้เป็นวัสดุประสาน เนื่องจากวัสดุมีสมบัติในการใช้งานที่ดี และหากนำไปเทียบกับวัสดุอื่นๆ จะพบว่า มีราคาที่ไม่สูง

3.2 สมบัติของวัสดุเส้นใยมะพร้าว ปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดละเอียด

3.2.1 จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานเชิงกลของวัสดุใยมะพร้าวของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาถึงสมบัติการรับแรงของเส้นใยมะพร้าว ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์ในการส่องดูขนาดหน้าตัดของเส้นใยมะพร้าว และใช้เครื่อง Instron รุ่น 5569 ในการทดสอบกำลังดึง ได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานเชิงกลของวัสดุใยมะพร้าว

| Sample | แรงดึง (นิวตัน) | หน้าตัด (ตร.ซม.) | ระยะยืด (มม.) | Elongation (%) | Tenacity (gf/denier) | ขนาดของเส้นใย Tex หรือ denier |
|---------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|-------------------------|----------------------------------|
| เส้นใยมะพร้าว | 5.4825 | 0.00312 | 9.3 | 37.2 | 446.09 | 48.8556 หรือ 448.7 |

3.3 สมบัติของปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดละเอียด

3.3.1 การเตรียมวัสดุ

3.3.1.1 เถ้าแกลบบดร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เพื่อหาน้ำหนักค้ำบนตะแกรง

3.3.1.2 ทราาย นำมาทำความสะอาดโดยเอาสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจนสะอาดแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

3.3.2 การทดสอบหาสมบัติจำเพาะของปูนซีเมนต์ และ เถ้าแกลบบดละเอียด

3.3.2.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบบดละเอียด โดยใช้ขวด Le Chatelier ตาม ASTM C 188 [21] ซึ่งเป็นการหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยการหาอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรที่แทนที่ด้วยน้ำในน้ำมันก๊าซ

3.3.2.2 การทดสอบน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบบดละเอียด ทดสอบโดยวิธี Wet Sieve Analysis [22] ซึ่งทำโดยการเอาตัวอย่างมาทำการร่อนผ่านตะแกรงโดยการใช้ น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือ บนตะแกรง ซึ่งจะเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดละเอียด

| ตัวอย่าง | ร้อยละค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (%) | ความถ่วงจำเพาะ |
|-------------------|---------------------------------|----------------|
| ปูนซีเมนต์ | 13.5 | 3.18 |
| เถ้าแกลบบดละเอียด | 7 | 1.99 |

3.3.3 การทดสอบซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

3.3.3.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ โดยวิธีเข็มไวแคต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 [23] และ มาตรฐาน ASTM C 191 [24] เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบหรือทรายบดร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน

3.3.3.2 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 109 [25] โดยมาตรฐานกำหนดส่วนผสมของมอร์ตาร์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก ใช้ค่าการไหล 105-115 สำหรับทรายออกตาวา แต่มีค่าการไหลต่ำกว่า 105-115 ถ้าใช้ทรายชนิดอื่น และ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลเท่ากับ 110 ± 5 สำหรับปูนซีเมนต์ชนิดอื่นที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [26] งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนน้ำที่ทำให้ค่าการไหลคงที่ ระหว่าง 105 ถึง 115 ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผสม เพื่อหาค่ากำลังอัดของ มอร์ตาร์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาถึงค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของวัสดุที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ ใช้มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนผสมที่กำหนดให้ค่าการไหลคงที่ ระหว่าง 105 ถึง 115 ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วันแต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทดสอบจำนวน 6 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

| ตัวอย่าง | สัดส่วนผสม โดยน้ำหนัก (กก.) | | | | |
|----------|-----------------------------|----------------|----------|---------|-----------|
| | ปูนซีเมนต์ (C) | เถ้าแกลบ (RHA) | ทราย (S) | น้ำ (W) | W/(C+RHA) |
| CON | 100 | - | 275 | 76.46 | 0.765 |
| GRH 10 | 90 | 10 | 275 | 76.46 | 0.765 |
| GRH 20 | 80 | 20 | 275 | 78.38 | 0.738 |

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการแทนความหมายต่าง ๆ ในการทำวิจัย

GRH หมายถึง เถ้าแกลบบดละเอียด

CON หมายถึง ตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม

10, 20 หมายถึง ปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

3.4 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยมี ดังนี้

3.4.1 เส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 3.1 เส้นใยมะพร้าว

3.4.2 เล้าเกลบ



รูปที่ 3.2 เล้าเกลบ

3.4.3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.4.4 ทรายละเอียด

3.4.5 น้ำประปา

3.4.6 แบบอัดขึ้นรูปที่ทำจากเหล็กเนื่องจากมีความแข็งแรงและสามารถใช้งานได้คงทน
แต่ยอัดขึ้นรูปตัวอย่างแท่งขนาด 10X10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร



รูปที่ 3.3 แบบเหล็กอัดขึ้นรูป

3.4.7 เครื่องผสมวัสดุประสานกับน้ำ (Mix Cement)

3.5 อัตราส่วนผสมที่ใช้ทดสอบ

อัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวในงานวิจัยครั้งนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนของแต่ละอัตราส่วนที่อายุ 28 วัน ซึ่งได้ทำการอ้างอิงอัตราส่วนผสมจากงานวิจัยของ วิโรจน์ ไกรเทพ [4] ได้แก่

อัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวประกอบด้วย เส้นใยมะพร้าว : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ททราย : น้ำ จำนวน 3 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก กก./ลบ.ม. ได้แก่

A1 (150 : 450 : 450 : 600)

A2 (167 : 500 : 500 : 683)

A3 (183 : 550 : 550 : 770)

อัตราส่วนมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวประกอบด้วย เส้นใยมะพร้าว : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : เถ้าแกลบ : ททราย : น้ำ จำนวน 3 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก กก./ลบ.ม. ได้แก่

B1 (150 : 405 : 45 : 450 : 600)

B2 (167 : 450 : 50 : 500 : 683)

B3 (183 : 495 : 55 : 550 : 770)

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวต่อ 1 ลบ.ม.

| Mix Ratio | Coconut Fiber (กก./ลบ.ม.) | Cement (กก./ลบ.ม.) | Sand (กก./ลบ.ม.) | Water (กก./ลบ.ม.) |
|-----------|---------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| A1 | 150 | 450 | 450 | 600 |
| A2 | 167 | 500 | 500 | 683 |
| A3 | 183 | 550 | 550 | 770 |

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวต่อ 1 ลบ.ม.

| Mix ratio | Coconut Fiber (กก./ลบ.ม.) | Cement (กก./ลบ.ม.) | Rice Husk Ash (กก./ลบ.ม.) | Sand (กก./ลบ.ม.) | Water (กก./ลบ.ม.) |
|-----------|---------------------------|--------------------|---------------------------|------------------|-------------------|
| B1 | 150 | 405 | 45 | 450 | 600 |
| B2 | 167 | 450 | 50 | 500 | 683 |
| B3 | 183 | 495 | 55 | 550 | 770 |

3.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

3.6.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.6.1.1 เตรียมวัสดุมอร์ตาร์ และมอร์ตาร์เถ้าแกลบตามปริมาณอัตราส่วนในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ททราย และเถ้าแกลบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ค่อยนำมาผสม



รูปที่ 3.4 การจัดเตรียมวัสดุตามอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5

3.6.1.2 เตรียมเส้นใยมะพร้าวตามปริมาณอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่ได้จากงานวิจัยของวิโรจน์ [4] ทำการฉีกเส้นใยมะพร้าวเพื่อแยกตัวออกจากกันให้มากที่สุด ก่อนจะนำไปผสมกับมอร์ตาร์หรือมอร์ตาร์เถ้าแกลบ เพื่อให้การจับตัวกันระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับมอร์ตาร์หรือมอร์ตาร์เถ้าแกลบง่ายมากขึ้น

3.6.1.3 นำเส้นใยมะพร้าวมาผสมกับมอร์ตาร์หรือมอร์ตาร์เถ้าแกลบให้ทั่วถึง



รูปที่ 3.5 นำเส้นใยมะพร้าวมาคลุกเคล้ากับมอร์ตาร์หรือมอร์ตาร์เถ้าแกลบ

3.6.1.4 เมื่อผสมเข้ากันดีแล้ว นำวัสดุที่ผสมมาใส่ในแบบแล้วอัดขึ้นรูปตามแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และทำการถอดแบบหลังจาก 24 ชม.



รูปที่ 3.6 นำวัสดุที่ผสมเสร็จแล้วมาใส่ในแบบแล้วอัดขึ้นรูป

3.6.1.5 นำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 3.7 การบ่มตัวอย่างทดสอบในน้ำ

3.6.1.6 เมื่อครบตามอายุการบ่มให้นำตัวอย่างออกจากน้ำและพักไว้ 24 ชม. เพื่อรอทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.6.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่าง

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ใช้ในการทดลองแรงต้านทานต่างๆ เช่น ทดสอบแรงอัด, ทดสอบแรงดึง, ทดสอบแรงดิ่ง และทดสอบแรงเฉือน



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM)

3.6.3 การทดสอบกำลังแรงอัด

นำตัวอย่างมาวางในเครื่องทดสอบ โดยให้แกนของตัวอย่างตรงกับศูนย์กลางของเครื่องทดสอบ ให้แผ่นเหล็กที่จะทำการกดตัวอย่างแนบสนิทกับตัวอย่างและตั้งค่ามาตรวัดให้เป็นศูนย์ เริ่มทำการทดสอบแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 [4] ของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีขนาด 10x10x10 เซนติเมตร โดยการให้น้ำหนักกดที่ตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ จนกว่าตัวอย่างจะถึงจุดคราก (Yield Point) หรือเกิดการวิบัติ (Failure) เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดและรูปลักษณะการวิบัติของตัวอย่างตามภาพที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test)

3.6.4 การทดสอบกำลังแรงดัด

เริ่มทำการทดสอบแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C 78 [4] ของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีขนาด 10x10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร โดยนำแท่งคานตัวอย่างมาวางบนฐานรองรับตามจุดที่ได้ทำการกำหนดไว้และเริ่มทำการทดสอบ โดยให้หัวของเครื่องทดสอบออกแรงกดที่จุดกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับทั้ง 2 ข้าง จนแท่งคานตัวอย่างถึงจุดคราก (Yield Point) หรือเกิดการวิบัติ (Failure) เมื่อการทดลองสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าหน่วยแรงดัดสูงสุดและรูปลักษณะการวิบัติของตัวอย่างตามภาพที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength Test)

3.6.5 การทดสอบกำลังแรงดึงโดยตรง [27]

เริ่มทำการทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 10x10 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร โดยนำตัวอย่างทดสอบมาเจาะรูเพื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เสริม ค่อยนำตัวอย่างทดสอบมาประกอบกับเครื่องทดสอบ ต่อมาให้ตั้งค่ามาตราวัดเป็นศูนย์และออกแรงดึงเล็กน้อยเพื่อให้เกิดความตึงระหว่างตัวอย่างทดสอบกับเครื่องทดสอบ เริ่มทำการทดสอบโดยให้เครื่องทดสอบออกแรงดึงอย่างสม่ำเสมอจนกว่าตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติ (Failure) เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าหน่วยแรงดึงโดยตรงสูงสุดและทำการบันทึกรูปลักษณะการวิบัติของตัวอย่างตามภาพที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength Test)

3.6.6 การทดสอบกำลังแรงเฉือน

เริ่มทำการทดสอบแรงเฉือนของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์
เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 10x10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร
โดย นำแท่งคานตัวอย่างมาวางบนฐานรองรับตามจุดที่ได้ทำการกำหนดไว้และเริ่มทำการทดสอบ
โดยให้หัวของเครื่องทดสอบออกแรงกดที่ระยะ d จนกว่าแท่งคานตัวอย่างจะถึงจุดคราก (Yield Point)
หรือเกิดการวิบัติ (Failure) เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลงให้ทำการบันทึกค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดและ
รูปลักษณะการวิบัติของตัวอย่างตามภาพที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength Test)



บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การนำเส้นใยมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยนำมาผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมและทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเพื่อเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้จากวัสดุธรรมชาติและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ โดยเส้นใยธรรมชาติที่เลือกใช้ ที่เป็นเส้นใยที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตร คือ ใยมะพร้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจ เป็นวัสดุธรรมชาติที่หาได้ง่าย มีความเหนียวทนทาน และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ในการทดลองจะใช้ปริมาณของน้ำหนักเส้นใยทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 150, 167 และ 183 กก./ลบ.ม. โดยมีผลของการทดสอบ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงเฉือน ที่อายุ 28 วัน

4.1 สมบัติมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด พบว่า ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีค่าความชื้นเหลือปกติมากกว่าปูนซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบทำให้สามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นได้ ส่วนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) พบว่า การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่าเวลาก่อตัวระยะต้นและเวลาก่อตัวระยะปลายน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วนประมาณ 23-45 นาที โดยที่การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เวลาการก่อตัวระยะต้นลดลง อย่างไรก็ตาม ASTM C 150 [28] กำหนดไว้ว่าไม่ควรน้อยกว่า 45 นาที และไม่ควรเกินกว่า 375 นาที ซึ่งซีเมนต์เพสต์ทั้งหมด ยังมีระยะเวลาก่อตัวต้นและปลาย เป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดละเอียด

| ชนิดของเพสต์ | ปริมาณน้ำที่ | เวลาก่อตัวระยะต้น | เวลาก่อตัวระยะปลาย |
|--------------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| | ความชื้นเหลือปกติ (%) | (นาที) | (นาที) |
| Cement | 25 | 103 | 180 |
| GRH10 | 40 | 80 | 135 |
| GRH20 | 41 | 67 | 135 |

กำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (CON) มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลของมอร์ตาร์เท่ากับ 105 ถึง 115 พบว่า มอร์ตาร์ควบคุม (CONFF) มีกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วันเท่ากับ 110, 173, 214, 244 และ 299 kg/cm² ตามลำดับ

ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) พบว่า ตัวอย่าง มอร์ตาร์ URHFF10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 82, 138, 192, 212 และ 223 kg/cm² และมอร์ตาร์ URHFF20 มีค่ากำลังอัด 63, 118, 165, 192 และ 264 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ URHFF20 ในช่วงอายุ 3 ถึง 60 วัน มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าตัวอย่าง URHFF10 เมื่อมอร์ตาร์ มีอายุ 90 วัน ตัวอย่าง มอร์ตาร์ URHFF20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ URHFF10 แสดงว่าในช่วงอายุ 3 ถึง 60 วัน ค่ากำลังอัดเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลักในส่วนของปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นยังไม่มาก เนื่องจากเถ้าแกลบไม่บดมีอนุภาคขนาดใหญ่ การแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้ปูนซีเมนต์ลดลง ค่ากำลังอัดจึงต่ำลง ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นสูงกว่ากำลังอัดที่สามารถชดเชยจากการลดลงของปูนซีเมนต์ได้จึงทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 สูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

| ตัวอย่างมอร์ตาร์ | กำลังอัด (kg/cm ²) | | | | |
|------------------|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|
| | 3 วัน | 7 วัน | 28 วัน | 60 วัน | 90 วัน |
| CON | 110 | 173 | 214 | 244 | 299 |
| GRH10 | 127 | 177 | 218 | 259 | 306 |
| GRH20 | 128 | 153 | 201 | 245 | 298 |

ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบบด (GRH) พบว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ GRH10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 127, 177, 218, 259 และ 306 kg/cm² และมอร์ตาร์ GRH20 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 128, 153, 201, 245 และ 298 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อเถ้าแกลบบดละเอียดสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้และมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้นค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์เป็นผลมาจากความละเอียดของเถ้าแกลบที่สูงขึ้นทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาค ความละเอียดที่สูงขึ้น ทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้มอร์ตาร์เนื้อแน่นขึ้นกำลังอัดจึงสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 พบว่า มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบทุกอายุการทดสอบ (ตัวอย่าง GRH10) มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอายุการทดสอบ

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงโดยตรง และกำลังรับแรงเฉือนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

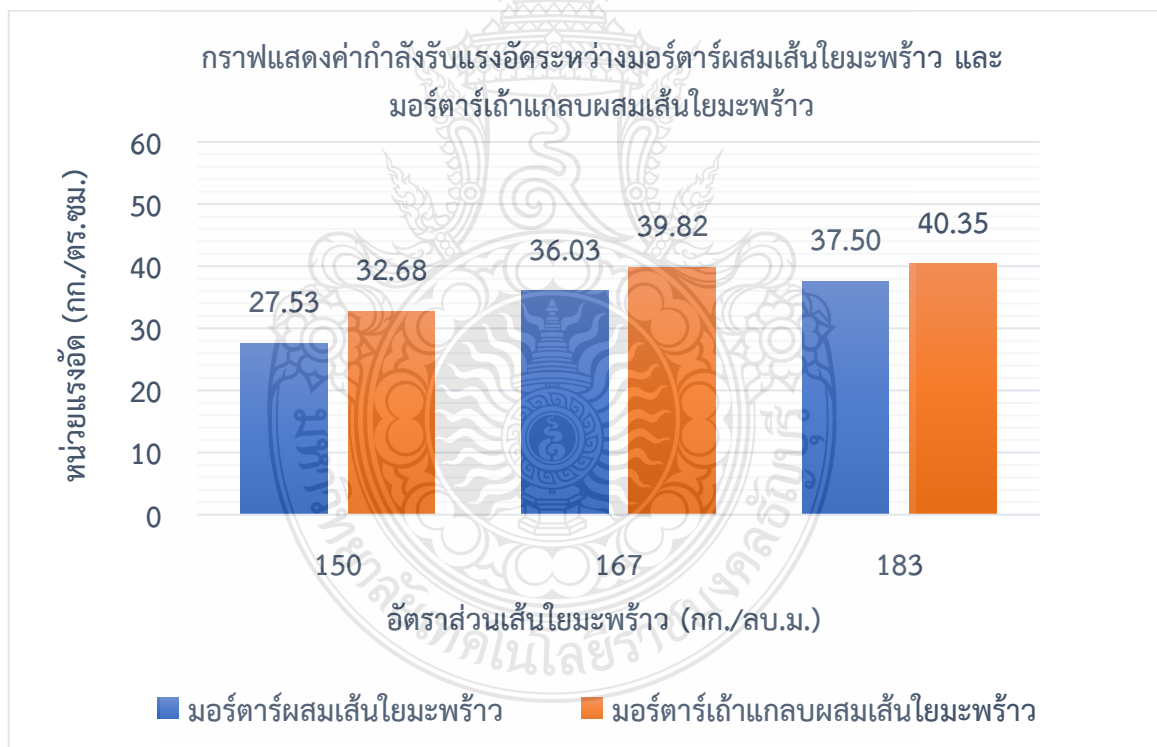
4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 27.53 | 36.03 | 37.50 |

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 32.68 | 39.82 | 40.35 |



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

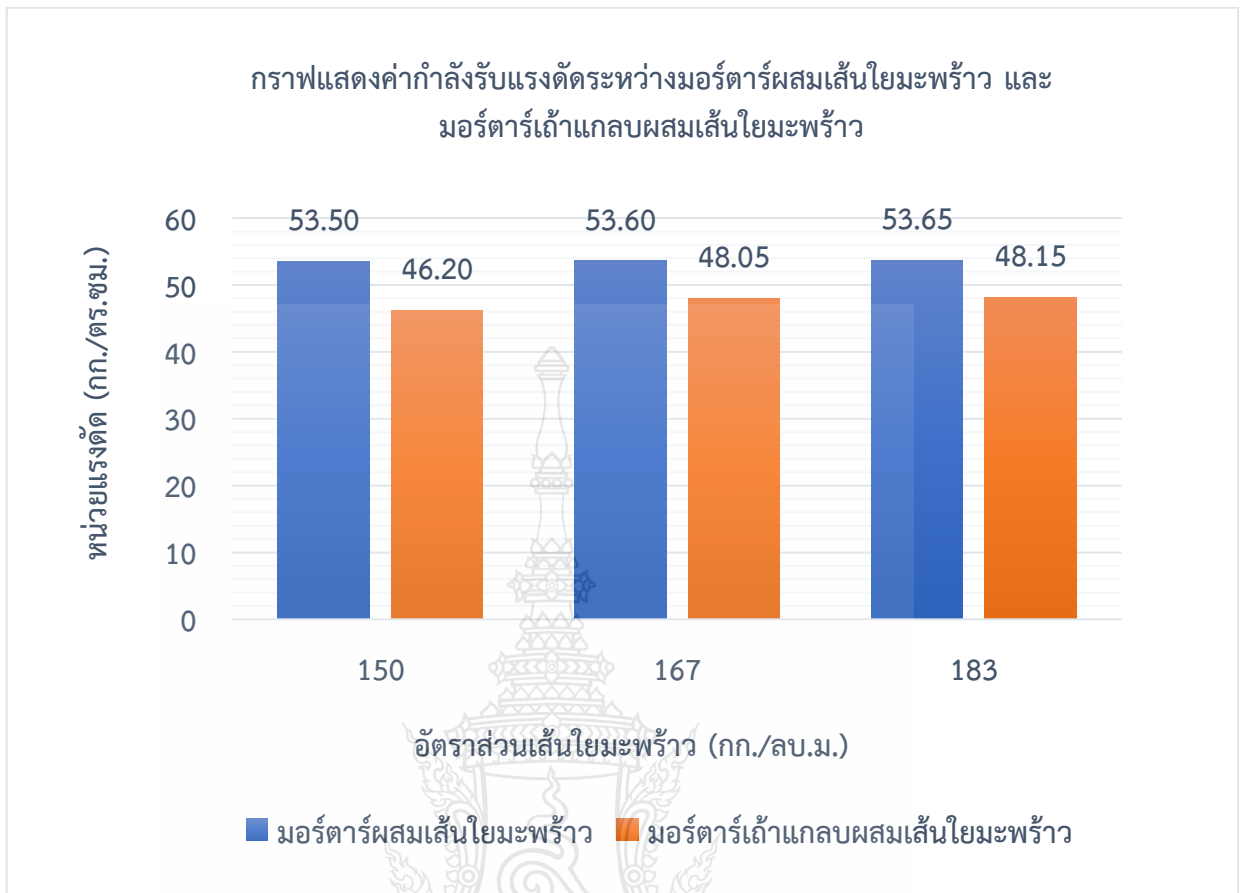
จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวตามมาตรฐาน ASTM C39 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตามตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าหน่วยแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ อัตราส่วน A3 และ B3 กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวสามารถแทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุประสานได้ดี ปริมาณเส้นใยมะพร้าวจะเพิ่มความหนาแน่นให้กับเนื้อวัสดุภายในชิ้นตัวอย่าง ความละเอียดของเถ้าแกลบทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และสามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ได้ จึงสามารถทำให้รับกำลังอัดได้ดีขึ้น 4.2.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| กำลังรับแรงดัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 53.50 | 53.60 | 53.65 |

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| กำลังรับแรงดัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 46.20 | 48.05 | 48.15 |



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวตามมาตรฐาน ASTM C78 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตามตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าหน่วยแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด คือ อัตราส่วน A3 และ B3 กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก เส้นใยมะพร้าวมีความเหนียวและหากผสมในปริมาณที่เหมาะสมเส้นใยจะทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในแท่งคานตัวอย่างเอาไว้ การวางตัวของเส้นใยมะพร้าวสำหรับการหล่อแท่งตัวอย่าง ที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวแรงที่มากระทำจะช่วยในการรับกำลังดัด ได้มากเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังดัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวจะพบว่า ค่ากำลังดัดของเส้นใยมะพร้าวผสมมอร์ตาร์สูงกว่าค่ากำลังดัดของเส้นใยมะพร้าวผสมมอร์ตาร์เถ้าแกลบ เนื่องจากมีความเป็นได้ที่มีมอร์ตาร์สามารถจับตัวกับเส้นใยมะพร้าวได้ดีกว่ามอร์ตาร์เถ้าแกลบ จึงส่งผลให้อัตราส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวรับกำลังดัดได้ดีกว่าอัตราส่วนมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว

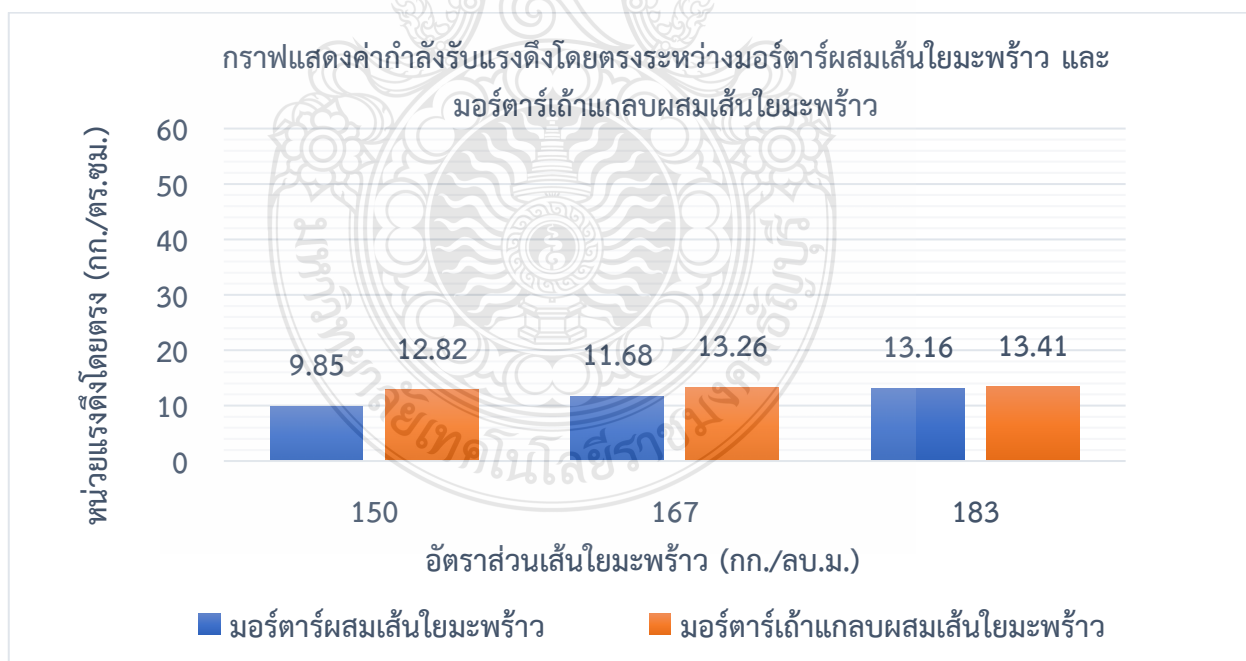
4.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้า
 แกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|---|---|---|
| กำลังรับแรงดึงโดยตรง เฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดึงโดยตรง เฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดึงโดยตรง เฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 9.85 | 11.68 | 13.16 |

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม
 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|---|---|---|
| กำลังรับแรงดึงโดยตรง เฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดึงโดยตรง เฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดึงโดยตรง เฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 12.82 | 13.26 | 13.41 |



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงโดยตรงและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวได้ค่าตามตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงที่อายุการบ่ม 28 วัน จะแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนที่มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยตรงสูงสุดคือ อัตราส่วน A3 และ B3 ค่ากำลังรับแรงดึงโดยตรงเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีความเหนียวและทนทาน รวมถึงอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมและการวางตัวของเส้นใยมะพร้าว ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกันกับแนวแรงที่มากกระทำส่งผลให้กำลังรับแรงดึงโดยตรงของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวมีค่ามากเพิ่มขึ้น

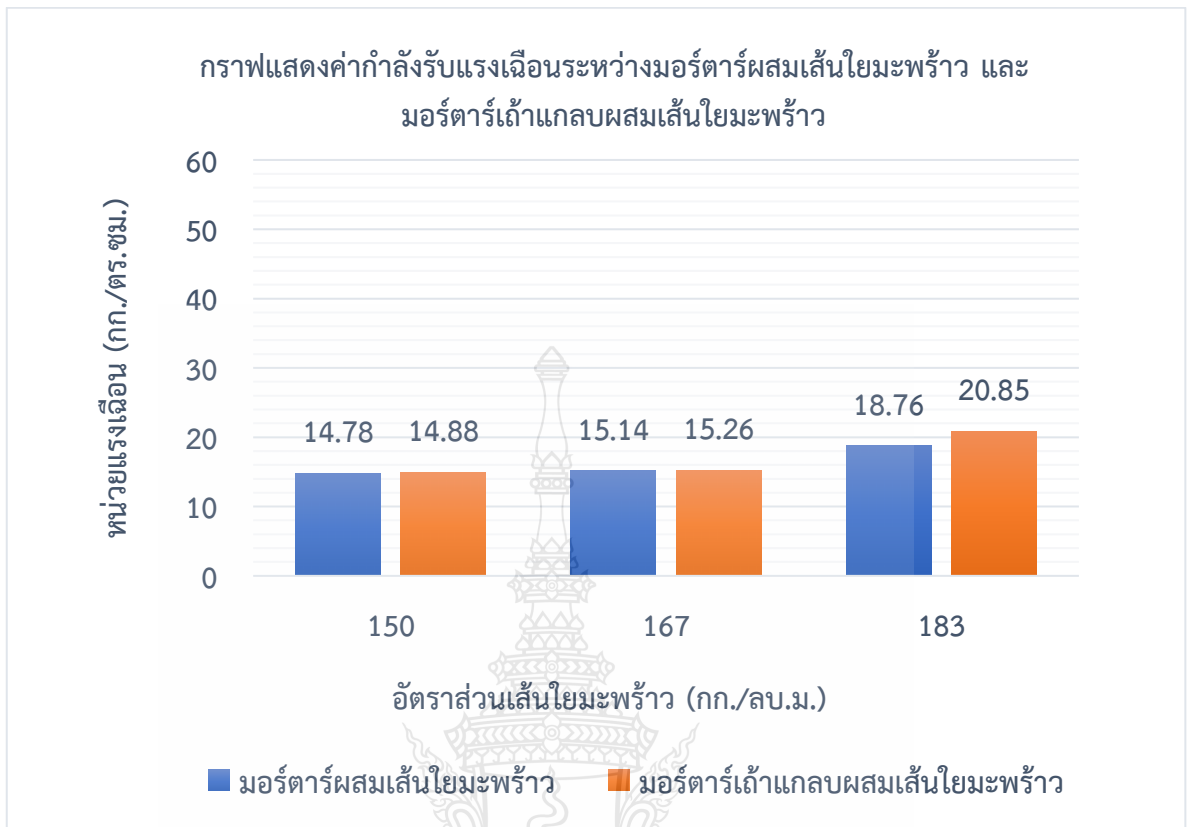
4.2.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|--|--|--|
| กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 14.78 | 15.14 | 18.76 |

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| เส้นใยมะพร้าว (150 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (167 กก./ลบ.ม.) | เส้นใยมะพร้าว (183 กก./ลบ.ม.) |
|--|--|--|
| กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) |
| 14.88 | 15.26 | 20.85 |



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวได้ค่าตามตารางที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่อายุการบ่ม 28 วัน จะแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด คือ อัตราส่วน A3 และ B3 ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเหนียวของเส้นใยมะพร้าวและการเรียงตัวของเส้นใยมะพร้าวเปรียบเสมือนตัวกันขวางระนาบ โดยจะถูกวางให้ตั้งฉากกับแนวแรงที่มากระทำเพื่อไม่ให้แท่งตัวอย่างเกิดการวิบัติได้ง่าย ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือน ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวของเนื้อวัสดุแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวมีค่ามากเพิ่มขึ้น

4.3 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสมบัติการรับกำลังมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| อัตราส่วน | กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดัด (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดึงโดยตรง (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงเฉือน (กก./ตร.ซม.) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| A1 | 27.53 | 53.50 | 9.85 | 14.78 |
| A2 | 36.03 | 53.60 | 11.68 | 15.14 |
| A3 | 37.50 | 53.65 | 13.16 | 18.76 |

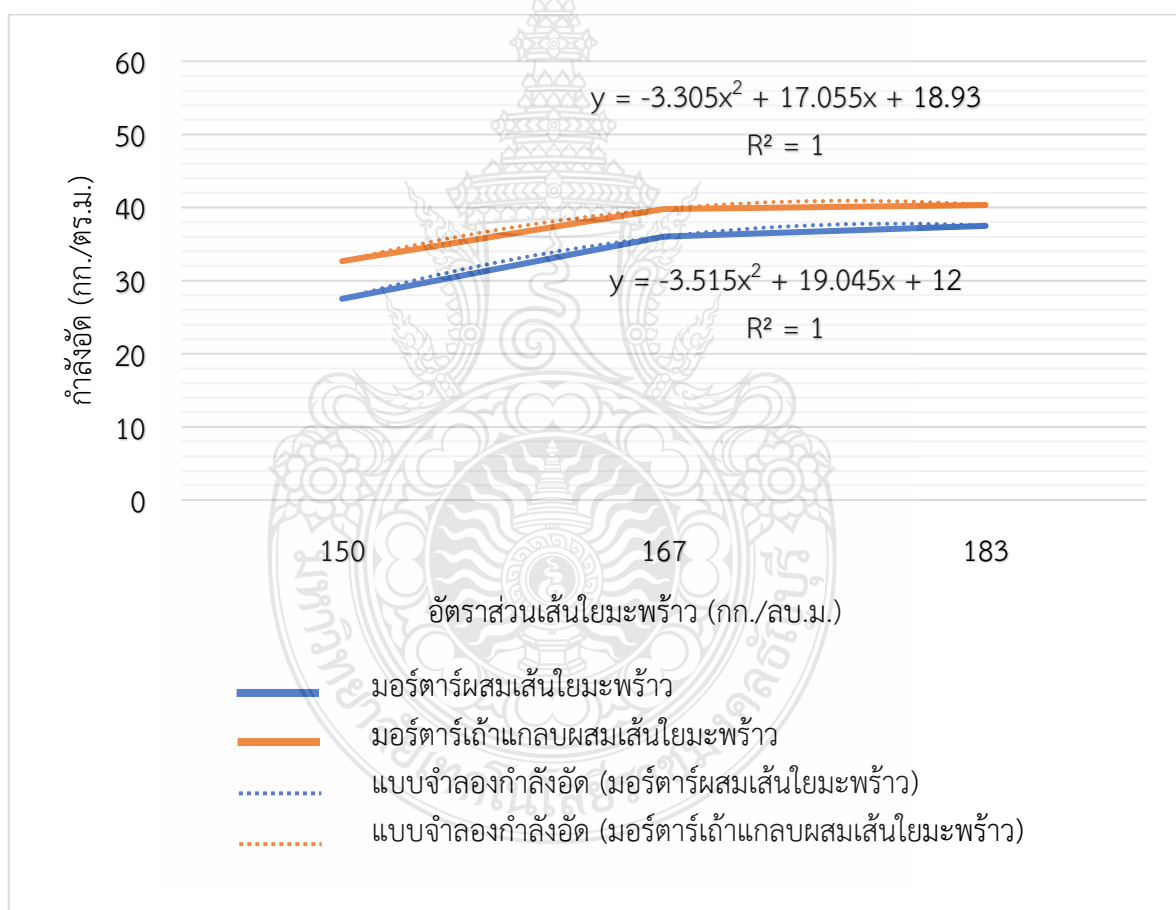
ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสมบัติการรับกำลังมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน

| อัตราส่วน | กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดัด (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงดึงโดยตรง (กก./ตร.ซม.) | กำลังรับแรงเฉือน (กก./ตร.ซม.) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| B1 | 32.68 | 46.20 | 12.82 | 14.88 |
| B2 | 39.82 | 48.05 | 13.26 | 15.26 |
| B3 | 40.35 | 48.15 | 13.41 | 20.85 |

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนต่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว

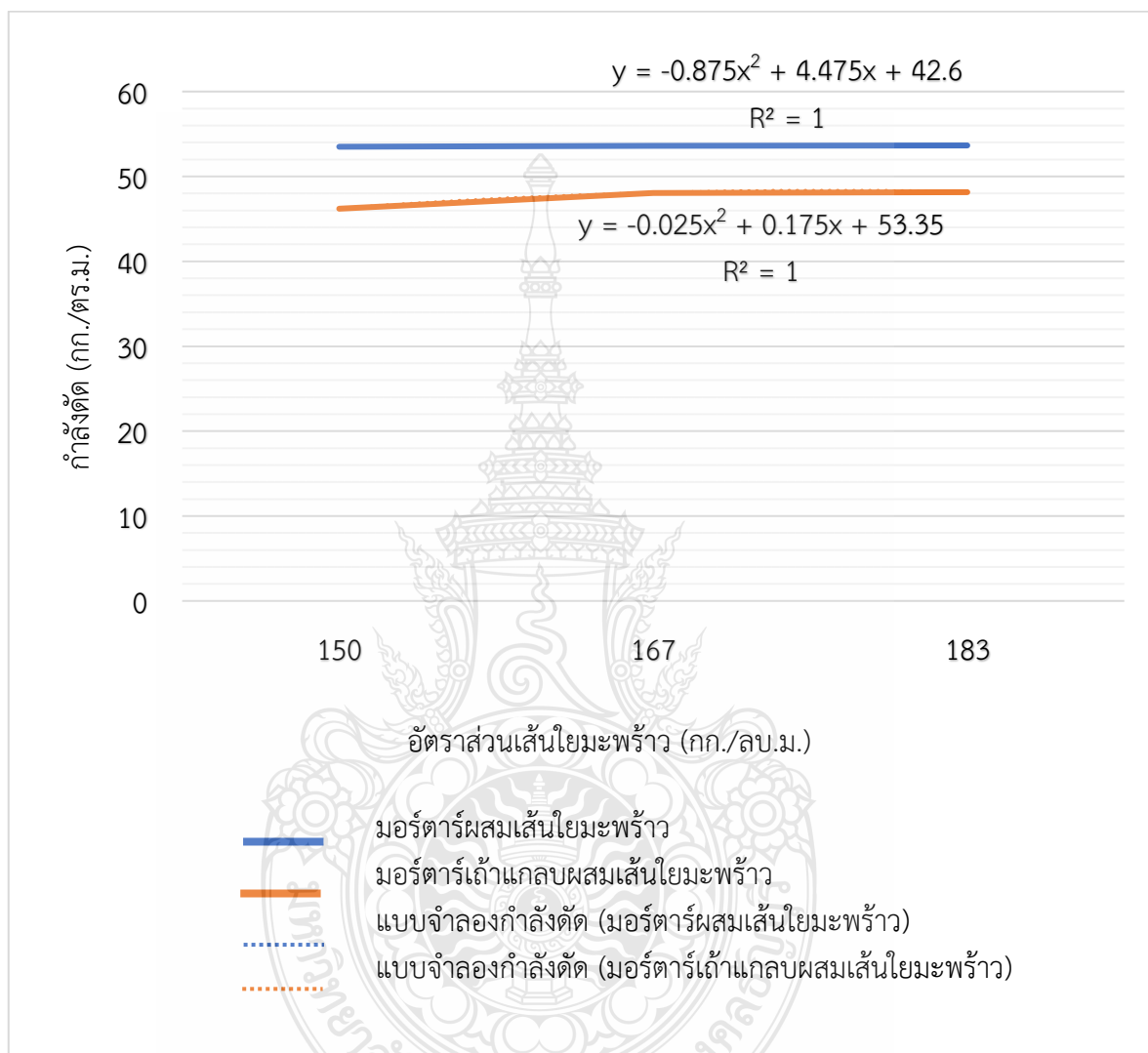
จากผลการวิจัย พบว่า ปริมาณเส้นใยมะพร้าวจะให้ความสัมพันธ์ที่ความสามารถในการรับกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนจะเพิ่มสูงขึ้นตามการปริมาณของเส้นใยมะพร้าว ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ โดยใช้สมการในการทำนายค่ากำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงโดยตรง และกำลังเฉือนจากปริมาณของเส้นใยมะพร้าว

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการหาแบบจำลองความสัมพันธ์จะพบว่าสมการที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ



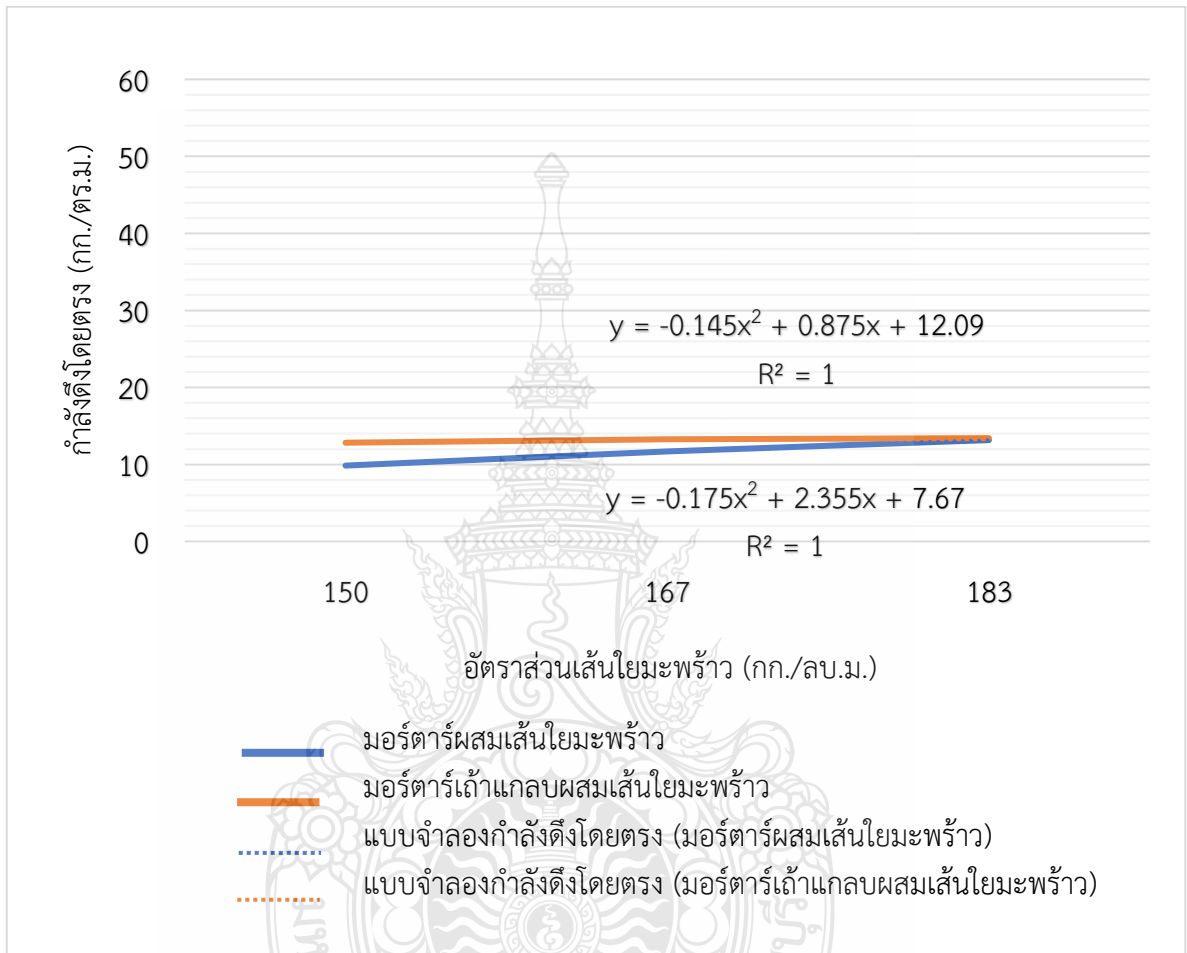
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังตัดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการหาแบบจำลองความสัมพันธ์จะพบว่าสมการที่ได้จะมีความสอดคล้องกัน



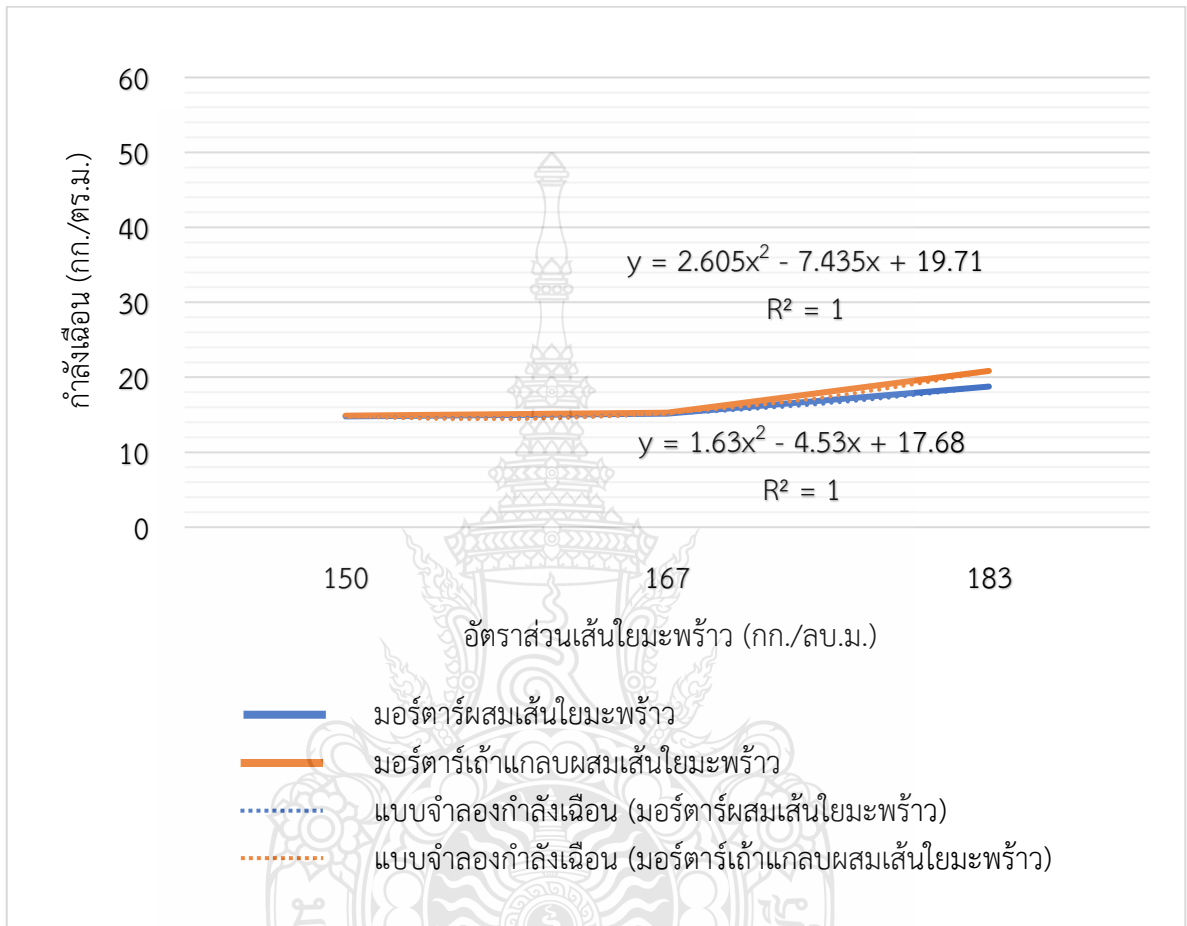
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังตัดและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงโดยตรงและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการหาแบบจำลองความสัมพันธ์จะพบว่าสมการที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงโดยตรงและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าวที่อายุการบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการหาแบบจำลองความสัมพันธ์จะพบว่าสมการที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนและปริมาณเส้นใยมะพร้าวของวัสดุ mortars ผสมเส้นใยมะพร้าว และ mortars เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว และมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าว ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึงโดยตรง และกำลังรับแรงเฉือน พบว่า

- 1) ปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมที่สุดในการผสมมอร์ตาร์ คือ 183 กก./ลบ.ม. ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดที่สามารถอัดขึ้นรูปได้
- 2) มอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวจะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์เส้นใยมะพร้าวทุกส่วนผสม โดยการเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าวก็จะทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้น
- 3) กำลังดัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวจะให้ค่าที่สูงกว่ามอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวทุกอัตราส่วนผสม และมีค่าสูงมากขึ้นตามปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่มากขึ้น ทั้งมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวและมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าว
- 4) มอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวจะให้ค่ากำลังดัดโดยตรงสูงกว่ามอร์ตาร์เส้นใยมะพร้าวทุกอัตราส่วนผสม และค่าแรงดัดจะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยมะพร้าว
- 5) มอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าวจะให้ค่าแรงเฉือนสูงกว่ามอร์ตาร์เส้นใยมะพร้าวทุกอัตราส่วนผสม และค่าแรงดัดจะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยมะพร้าว

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับข้อเสนอแนะในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อนำไปปรับปรุงการทำวิจัย ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิจัยในครั้งถัดไปมีดังนี้

5.2.1 ควรมีการทดสอบคุณสมบัติด้านอื่นด้วยเช่น ความคงทน การดูดซึมน้ำ เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น

5.2.2 ควรมีการทดสอบปริมาณการใช้เถ้ากลบที่แตกต่างกัน และขนาดของเถ้ากลบที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสมบัติมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าว

บรรณานุกรม

- [1] พ็ชร ออนพรม, “การใช้เก้าอี้แลกเปลี่ยนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบา,” บทความวิจัยและนวัตกรรมอาชีวศึกษา, ปีที่ 1, น. 1-15, 2560.
- [2] วิเชียร ชาลี, “ผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อกำลังอัดคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเก้าอี้แลกเปลี่ยน,” รายงานวิจัย, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2560.
- [3] ชาคริต โยสอาด, รัฐพล สมนา และ จีรศักดิ์ สุพรรณวัน, “การใช้เก้าอี้แลกเปลี่ยนวัสดุบ่มภายในมอร์ตาร์,” นำเสนอที่ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, นครราชสีมา, 2559.
- [4] วิโรจน์ ไกรเทพ และ จตุพล ตั้งปกาศิต, “สมบัติเชิงกลของเสริมเส้นใยมะพร้าวโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน,” นำเสนอที่ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 14, ประจวบคีรีขันธ์, 2562.
- [5] พฤติพงศ์ พันธมนัสโสภา, “ความคงทนและสมบัติของเส้นใยปอกระเจาที่ปรับปรุงผิวผสมในวัสดุคอมโพสิต,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ, 2557.
- [6] ปาริชาติ โรหิตาคนี, “การเสริมแรงโพลีเอทิลีนด้วยเส้นใยคอปและก้านมะพร้าว,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550.
- [7] พงศธร กองแก้ว, วิจิตร เขาว์วันกลาง และ ไพฑูรย์ สุขศรีงาม, “สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมชีวภาพเสริมแรงด้วยเส้นใยรากหญ้าแฝกผสมเส้นใยมะพร้าวและผสมเส้นใยเปลือกถั่วลิสงในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน,” วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 33, น. 159-173, 2560.
- [8] วชิรินทร์ แซ่หลาย, “ผลของเส้นใยเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลของโพนีโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [9] สุธิพ ศรีชู, “ผลกระทบของการใช้เก้าอี้แลกเปลี่ยนจากโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, 2559.
- [10] เอกสิทธิ์ ศิริสุรวงศ์, “การพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินตะกอนประปาและเก้าอี้แลกเปลี่ยน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2558.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] วิเชียร ชาลี, “ผลของความละเอียดของเก้าแกลบและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2560.
- [12] ปณิธิ เปรมสัจธรรม, “การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดและการตรึงโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีเก้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [13] วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, “การใช้เก้าปาล์มน้ำมันและเก้าแกลบเปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง,” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 14, น. 27-32, 2546.
- [14] สุรเชษฐ วรรณ, “การศึกษาการพัฒนากำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ด้วยเก้าแกลบบด,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, ปีที่ 2, น. 72-78, 2563.
- [15] ประชุม คำพุ่ม และ ว่าที่ร้อยตรีกิตติพงษ์ สุวีโร, “การศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเก้าแกลบเสริมแผ่นยางธรรมชาติ,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, 2553.
- [16] นิตยา นาน้ำเขียว และ ชัยวัฒน์ แสงเขียว, “คอนกรีตผสมเส้นใยผักตบชวา,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเกษตร, 2542.
- [17] วรณช ดีละมัน, กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล และ กิตติยศ ตั้งสัจวงศ์, “การพัฒนาและผลิตอิฐบล็อกมวลเบาโดยการผสมเส้นใยธรรมชาติ,” รายงานวิจัย, ภาควิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2559.
- [18] บวร อิงศรางกูร ณ อยุธยา, “การศึกษากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำผสมเพอร์ไลต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยสังเคราะห์หลังการเผาไหม้,” รายงานวิจัย, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2557.
- [19] นิรุช สุขสมเขตร, “คอนกรีตผสมเส้นใยมะพร้าว,” โครงการงานวิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเกษตร, 2540.

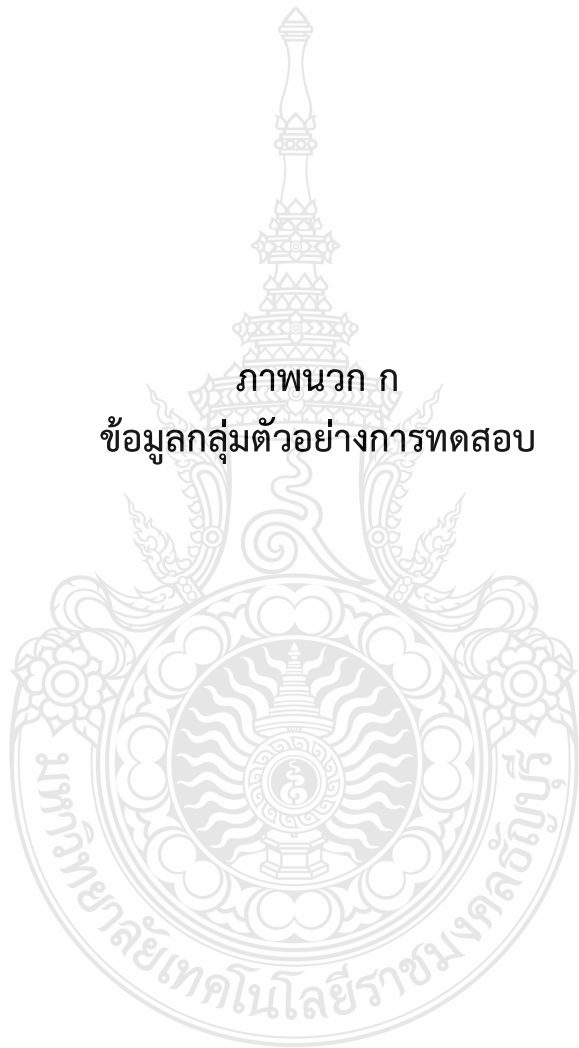
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] ประพนธ์ เฟื่องฟู, “พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตู่มน้ำหนัก,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, 2555.
- [21] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188-95, “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement,” Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01, pp. 179-180, 2001.
- [22] American Society for Testing and Materials, ASTM C430-94, “Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45 Micrometer (No.325) Sieve,” Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01, pp. 212-214, 1995.
- [23] American Society for Testing and Materials, ASTM C 187-98, “Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement,” Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01, pp. 177-178, 2001.
- [24] American Society for Testing and Materials, ASTM C 191-99, “Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle,” Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01, pp. 181-183, 2001.
- [25] American Society for Testing and Materials, ASTM C 109/C 109M-99, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens,” Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01, pp. 83-88, 2001.
- [26] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์มวลรวมและคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1. 2556. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในบรมราชูปถัมภ์, 2556.
- [27] ตะวัน เพชรอรุณ, “การใช้ตะกอนประปาในมอร์ตาร์เกร้าท์รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, 2563.
- [28] American Society for Testing and Materials, ASTM C 150-00, “Standard Specification for Portland Cement,” Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01, pp. 149-155, 2001.

ภาพนวก



ภาพนวก ก
ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างการทดสอบ



ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ทผสมเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ก 1 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ทผสมเส้นใยมะพร้าว

| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังอัด (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 10 | 0.001 | 2.92 | 2,250 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 10 | 0.001 | 2.94 | 3,520 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 10 | 0.001 | 2.82 | 2,490 |
| | เฉลี่ย | 100 | 10 | 0.001 | 2.89 | 2,753 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 10 | 0.001 | 2.82 | 3,310 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 10 | 0.001 | 2.96 | 3,720 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 10 | 0.001 | 2.96 | 3,780 |
| | เฉลี่ย | 100 | 10 | 0.001 | 2.91 | 3,603 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 10 | 0.001 | 2.90 | 4,160 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 10 | 0.001 | 2.86 | 3,730 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 10 | 0.001 | 2.92 | 3,360 |
| | เฉลี่ย | 100 | 10 | 0.001 | 2.89 | 3,750 |

ตารางที่ ก 2 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว

| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังดัด (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 8.72 | 1065 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 8.96 | 1085 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 8.48 | 1060 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 8.72 | 1,070 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.24 | 1120 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.00 | 1082 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.32 | 1014 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.19 | 1,072 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 8.28 | 1067 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 8.88 | 1145 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.14 | 1008 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 8.77 | 1,073 |

ตารางที่ ก 3 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว

| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังดึงโดยตรง (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 30 | 0.003 | 4.32 | 926 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 30 | 0.003 | 4.60 | 966 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 30 | 0.003 | 4.44 | 1063 |
| | เฉลี่ย | 100 | 30 | 0.003 | 4.45 | 985 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 30 | 30 | 4.16 | 1211 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 30 | 30 | 4.52 | 1132 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 30 | 30 | 4.70 | 1160 |
| | เฉลี่ย | 100 | 30 | 0.003 | 4.46 | 1,168 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 30 | 0.003 | 4.76 | 1347 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 30 | 0.003 | 4.60 | 1364 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 30 | 0.003 | 4.34 | 1236 |
| | เฉลี่ย | 100 | 30 | 0.003 | 4.57 | 1,316 |

ตารางที่ ก 4 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว

| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังเฉือน (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.11 | 1904 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.02 | 1760 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.07 | 1880 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.07 | 1,848 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.10 | 1890 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.08 | 1820 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.10 | 1969 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.09 | 1,893 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.08 | 2410 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.16 | 2505 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.08 | 2120 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.10 | 2,345 |

ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์เก่าผสมเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ก 5 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์เก่าผสมเส้นใยมะพร้าว

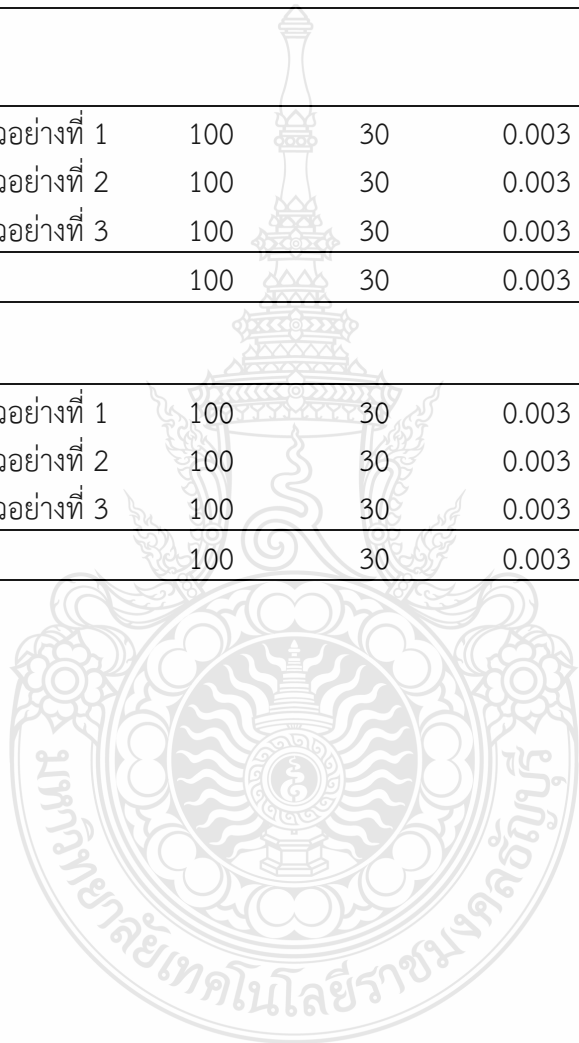
| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังอัด (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 10 | 0.001 | 3.02 | 3,142 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 10 | 0.001 | 2.91 | 3,458 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 10 | 0.001 | 2.97 | 3,204 |
| | เฉลี่ย | 100 | 10 | 0.001 | 2.97 | 3,268 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 10 | 0.001 | 2.95 | 4,234 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 10 | 0.001 | 2.89 | 3,950 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 10 | 0.001 | 2.91 | 3,762 |
| | เฉลี่ย | 100 | 10 | 0.001 | 2.92 | 3,982 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 10 | 0.001 | 3.10 | 4,254 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 10 | 0.001 | 3.02 | 4,025 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 10 | 0.001 | 2.98 | 3,826 |
| | เฉลี่ย | 100 | 10 | 0.001 | 3.03 | 4,035 |

ตารางที่ ก 6 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าว

| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังดัด (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 8.85 | 900 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.14 | 921 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 8.73 | 950 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 8.72 | 924 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.48 | 982 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.22 | 980 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.31 | 921 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.34 | 961 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 8.84 | 984 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 8.72 | 944 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.35 | 961 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 8.97 | 963 |

ตารางที่ ก 7 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว

| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังดึงโดยตรง (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 30 | 0.003 | 4.21 | 1,256 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 30 | 0.003 | 4.53 | 1,236 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 30 | 0.003 | 4.65 | 1,353 |
| | เฉลี่ย | 100 | 30 | 0.003 | 4.46 | 1,282 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 30 | 0.003 | 4.32 | 1,229 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 30 | 0.003 | 4.48 | 1,368 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 30 | 0.003 | 4.61 | 1,380 |
| | เฉลี่ย | 100 | 30 | 0.003 | 4.47 | 1,326 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 30 | 0.003 | 4.41 | 1,345 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 30 | 0.003 | 4.25 | 1,348 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 30 | 0.003 | 4.72 | 1,329 |
| | เฉลี่ย | 100 | 30 | 0.003 | 4.46 | 1,341 |



ตารางที่ ก 8 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์เถ้าเคลบผสมเส้นใยมะพร้าว

| เส้นใยมะพร้าว (กก.) | จำนวน | พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.) | ความยาว (ซม.) | ปริมาตร (ตร./ลบ.ม) | น้ำหนัก (กก.) | กำลังเฉือน (กก.) |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| 0.9 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.29 | 1,878 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.78 | 1,758 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.44 | 1,946 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.50 | 1,860 |
| 1.0 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.14 | 1,956 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.49 | 1,894 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.32 | 1,901 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.32 | 1,907 |
| 1.1 | ตัวอย่างที่ 1 | 100 | 60 | 0.006 | 9.22 | 2,894 |
| | ตัวอย่างที่ 2 | 100 | 60 | 0.006 | 9.48 | 2,522 |
| | ตัวอย่างที่ 3 | 100 | 60 | 0.006 | 9.61 | 2,402 |
| | เฉลี่ย | 100 | 60 | 0.006 | 9.44 | 2,606 |

ภาพผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณผลการทดสอบ



ข 1 ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับแรงอัด

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

เมื่อ σ_c คือ หน่วยแรงอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)

P คือ น้ำหนักสูงสุด (กก.)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งทดสอบ (ตร.ซม.)

ข 1.1 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol.
$$\sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{3,603}{100} = 36.03 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

ดังนั้น หน่วยกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ตร.ม. เท่ากับ 36.03 กก./ตร.ซม.

ข 1.2 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol.
$$\sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{3,982}{100} = 39.82 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

ดังนั้น หน่วยกำลังอัดของมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม. เท่ากับ 39.82 กก./ตร.ซม.

ข 2 ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับแรงดัด

$$\sigma_f = \frac{PL}{bd^2} \text{ กรณีคานหักในช่วง } L/3 \text{ ถึง } 2L/3$$

$$\sigma_f = \frac{3Pa}{bd^2} \text{ กรณีคานไม่หักในช่วง } L/3 \text{ ถึง } 2L/3$$

- เมื่อ σ_f คือ เป็นหน่วยแรงดัดประลัยของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
P คือ เป็นน้ำหนักประลัยที่กระทำให้คอนกรีตแตกหัก (กก.)
L คือ เป็นช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับกับจุดให้น้ำหนัก (ซม.)
B คือ เป็นความกว้างของคาน (ซม.)
D คือ เป็นความลึกของคาน (ซม.)
a คือ เป็นระยะเฉลี่ยจากจุดรองรับถึงจุดแตกหักของคาน (ซม.)

ข 2.1 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol.”
$$\sigma_f = \frac{PL}{bd^2} = \frac{1,072(50)}{(10)(10)^2} = 53.60 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

ดังนั้น หน่วยกำลังดัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม. เท่ากับ 53.60 กก./ตร.ซม.

ข 2.2 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงดัดมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol.”
$$\sigma_f = \frac{PL}{bd^2} = \frac{961(50)}{(10)(10)^2} = 48.50 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

ดังนั้น หน่วยกำลังดัดของมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม. เท่ากับ 48.05 กก./ตร.ซม.

ข 3 ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับแรงดึงโดยตรง

$$\sigma_t = \frac{P}{A}$$

เมื่อ σ_t คือ หน่วยแรงดึงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด (กก./ตร.ซม.)

P คือ น้ำหนักสูงสุด (กก.)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งทดสอบ (ตร.ซม.)

ข 3.1 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงดึงโดยตรงของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol. $\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{1,168}{100} = 11.68 \text{ กก./ตร.ซม.}$

ดังนั้น หน่วยกำลังดึงโดยตรงของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม. เท่ากับ 11.68 กก./ตร.ซม.

ข 3.2 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงดึงโดยตรงของมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol. $\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{1,326}{100} = 13.26 \text{ กก./ตร.ซม.}$

ดังนั้น หน่วยกำลังดึงโดยตรงของมอร์ตาร์เถ้าแกลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม. เท่ากับ 13.26 กก./ตร.ซม.

ข 4 ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับแรงเฉือน

$$\tau = \frac{P(L-D)}{Lbd}$$

- เมื่อ τ คือ หน่วยแรงเฉือน (กก./ตร.ซม.)
P คือ นำหนักกระทำ (กก.)
L คือ ระยะช่วงความยาวของคาน (ซม.)
B คือ ความกว้างของคาน (ซม.)
d คือ ความลึกของคาน (ซม.)
D คือ ระยะห่างจากฐานรองรับถึงแนวแรงกระทำ ด้านที่ใกล้กว่า (ซม.)

ข 4.1 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol. $\tau = \frac{P(L-D)}{Lbd} = \frac{1,893(50-10)}{50(10)(10)} = 15.14$ กก./ตร.ซม.

ดังนั้น หน่วยกำลังเฉือนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม. เท่ากับ 15.14 กก./ตร.ซม.

ข 4.2 คำนวณหาหน่วยกำลังรับแรงเฉือนมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม.

Sol. $\tau = \frac{P(L-D)}{Lbd} = \frac{1,907(50-10)}{50(10)(10)} = 15.26$ กก./ตร.ซม.

ดังนั้น หน่วยกำลังเฉือนของมอร์ตาร์เถ้ากลบผสมเส้นใยมะพร้าว 167 กก./ลบ.ม. เท่ากับ 15.26 กก./ตร.ซม.

ประวัติผู้เขียน

| | |
|---------------------|---|
| ชื่อ - นามสกุล | นายสิทธิศักดิ์ คำชาย |
| วัน เดือน ปี | 5 สิงหาคม 2538 |
| ที่อยู่ | 541/2 บ้านง่อน ต.สว่างแดนดิน อ.สว่างแดนดิน จ.สกลนคร 47110 |
| ประวัติการศึกษา | ปริญญาตรี คณะอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลอีสาน วิทยาเขต สกลนคร |
| ปีที่สำเร็จการศึกษา | 2560 |
| ประวัติการทำงาน | - |
| เบอร์โทรศัพท์ | 098 342 4061 |
| อีเมล | sitthisak_k@mail.rmutt.ac.th |



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of
Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright
owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

สิทธิศักดิ์ คำชาย
(นายสิทธิศักดิ์ คำชาย)

