



การพัฒนารีแอีคทีฟพาวเดอร์คอนกรีตที่มีเ้าลอยปริมาณสูง

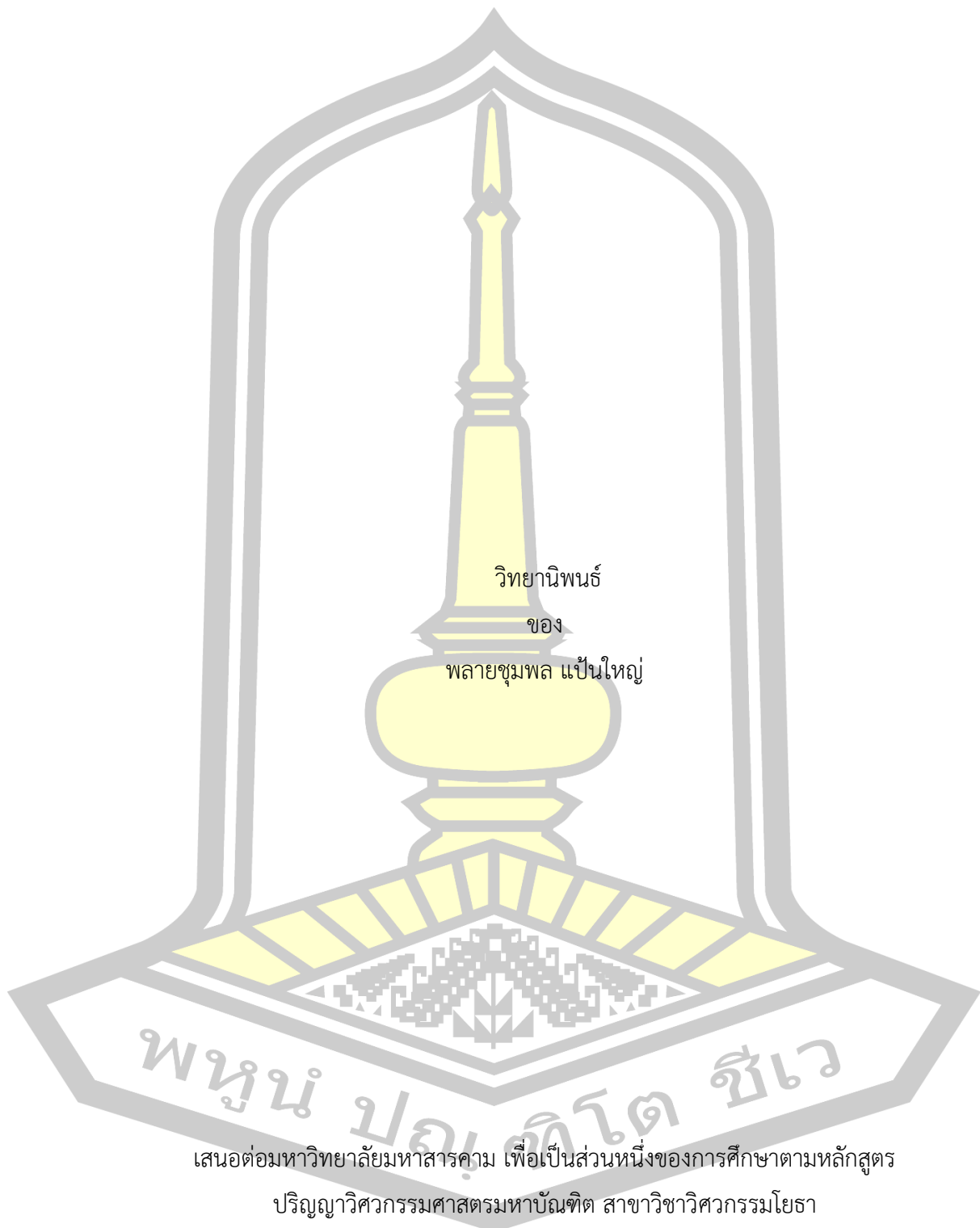
วิทยานิพนธ์
ของ
พलयชุมพล แป้นใหญ่

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

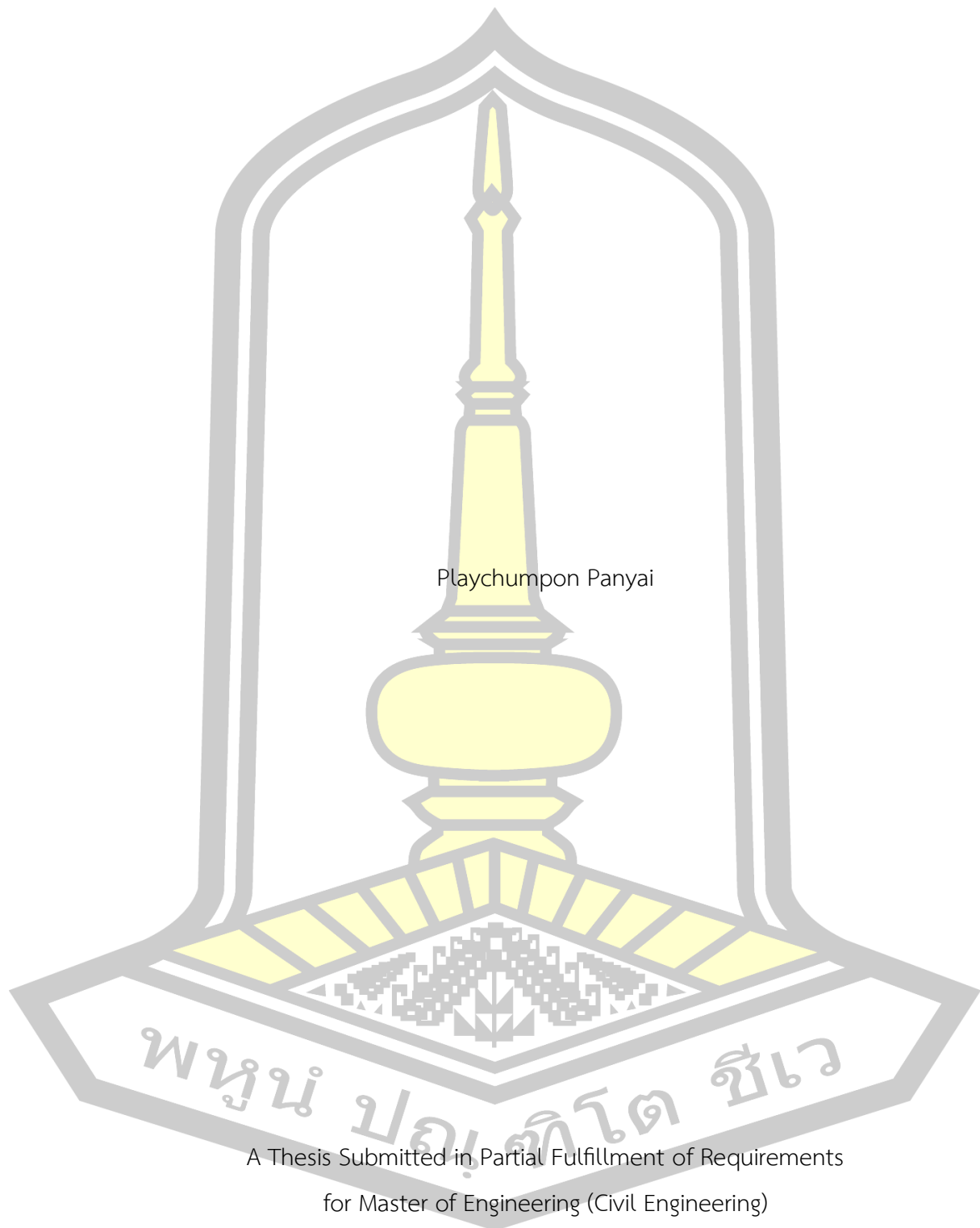
การพัฒนารีแอ็คทีฟพาวเดอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณสูง



พฤศจิกายน 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of High-Volume Fly Ash Reactive Powder Concrete



Playchumpon Panyai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Civil Engineering)

November 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายพลายชุมพล แป้นใหญ่
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. วัจนวงศ์ กรีพละ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โขติณอม)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การพัฒนารีแอ็คทีฟพาวเดอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณสูง
ผู้วิจัย พลายชุมพล แป้นใหญ่
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. กริสน์ ชัยมูล
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และความทนทานของรีแอ็คทีฟพาวเดอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC) ที่ใช้เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ชั้นคุณภาพ F แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 20%, 40% และ 60% โดยน้ำหนัก เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาด ในปริมาณ 2% โดยปริมาตร ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การไหลแผ่ ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดัด ทดสอบคุณสมบัติความทนทาน ได้แก่ อัตราการดูดซึมน้ำ และการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง พบว่า RPC ที่ใช้เถ้าลอยในปริมาณ 20%, 40%, 60% มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 149, 135, 117 MPa ตามลำดับ รวมถึงค่าความทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งในช่วงระดับต่ำถึงต่ำมาก อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกล และความทนทานของ RPC

คำสำคัญ : รีแอ็คทีฟพาวเดอร์คอนกรีต, เถ้าลอยปริมาณสูง, เส้นใยเหล็กแบบคละขนาด, คุณสมบัติเชิงกล และความทนทาน

พจนัน ปณฺ ทิโต ชีเว

TITLE Development of High-Volume Fly Ash Reactive Powder Concrete
AUTHOR Playchumpon Panyai
ADVISORS Associate Professor Krit Chaimoon , Ph.D.
DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering
UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2025
University

ABSTRACT

This research aims to study the mechanical properties and durability of Reactive Powder Concrete (RPC) incorporating Class F Fly Ash (FA) as a partial replacement for cement at 20%, 40% and 60% by weight. The RPC mixes were reinforced with 2% mixed-size steel fibers by volume. The physical tested property was flow test. The mechanical properties tested included compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength. The durability tested properties included water absorption rate and rapid chloride permeability. The results showed that RPC with fly ash contents of 20%, 40% and 60% exhibited maximum compressive strengths of 149, 135, and 117 MPa respectively, as well as chloride ion permeability in the range of low to very low levels. However, increasing the fly ash content affected the mechanical properties and durability of the RPC.

Keyword : Reactive Powder Concrete (RPC), High-Volume Fly Ash, Mix-Sized Steel Fibers (MST), Mechanical properties and durability

พหุ ประถมศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ในทุ ก ด้ าน และความเอื้อเฟื้ออย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.กริสน์ ชัยมูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก โดยมีผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัจน วงศ์ กรีพละ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ รองศาสตราจารย์ ดร.สพลาภ หอมวุฒิม่วงค์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ ตลอดจน แนวทางในการแก้ไขปัญหาค าว ะ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการโยธา และนิสิตรุ่นน้องที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุน ในการดำเนินการทดลองจนงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้ที่เป็ นที่รักของข้าพเจ้า ซึ่งได้คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือในการทำงานวิจัย รวมทั้งแม่ของข้าพเจ้าที่เป็นหนึ่งในแรงใจสำคัญ ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ที่เป็นแรง สนับสนุนที่สำคัญที่สุดทั้งในด้านความรัก ความเชื่อมั่น และทุนทรัพย์ตลอดระยะเวลาการจัดทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

พลายชุมพล แป้นใหญ่

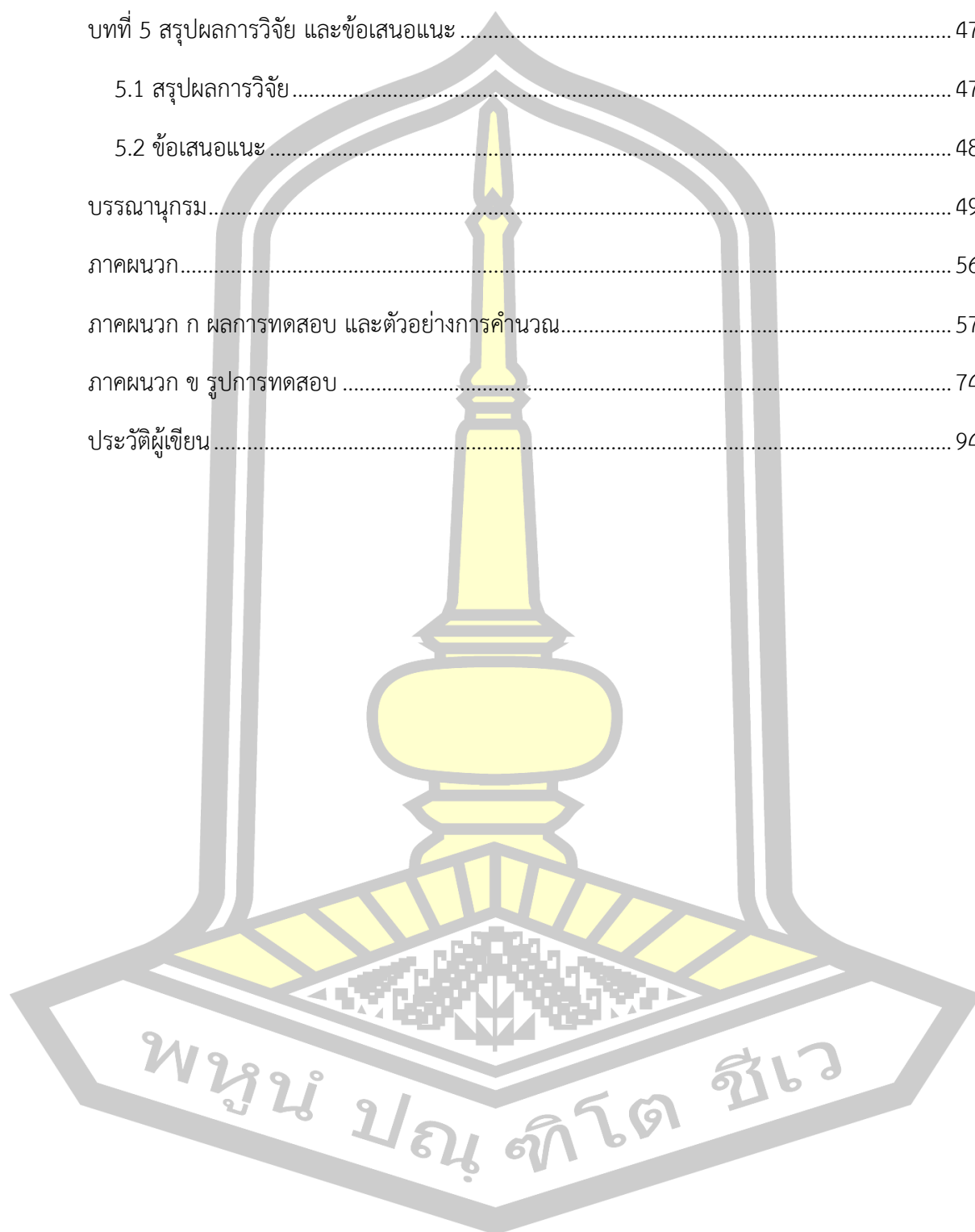


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รีแอคทีฟพาวเดอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC).....	4
2.1.1 ส่วนประกอบของ RPC.....	5
2.1.2 คุณสมบัติเชิงกลของ RPC.....	7
2.2 เถ้าลอย.....	8
2.3 RPC ผสมเถ้าลอย.....	9
2.4 ก๊าซเรือนกระจก.....	11
2.4.1 คาร์บอนฟุตพริ้นท์.....	11
บทที่ 3 วิธีการ และแผนการดำเนินการศึกษา.....	12
3.1 วัสดุสำหรับการทดสอบ.....	12

3.2 สัดส่วนผสม.....	16
3.3 ขั้นตอนการผสม.....	17
3.4 การทดสอบ.....	21
3.4.1 การทดสอบการไหลแผ่.....	22
3.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	23
3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก.....	23
3.4.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด.....	24
3.4.5 การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ.....	25
3.4.6 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง.....	27
3.4.7 คาร์บอนฟรุตพริ้นท์.....	28
3.4.8 การประเมินราคา.....	29
บทที่ 4 ผลการวิจัย และการอภิปรายผล.....	31
4.1 การพัฒนากำลังรับแรงอัด.....	32
4.1.1 ผลกระทบต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด.....	32
4.1.2 ผลกระทบเส้นใยเหล็กต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด.....	34
4.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก.....	36
4.2.1 ผลกระทบต่อการพัฒนากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก.....	36
4.2.2 ผลกระทบเส้นใยเหล็กต่อการพัฒนากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก.....	37
4.3 กำลังรับแรงดัด.....	38
4.3.1 ผลกระทบต่อการพัฒนากำลังรับแรงดัด.....	38
4.3.2 ผลกระทบเส้นใยเหล็กต่อการพัฒนากำลังรับแรงดัด.....	40
4.4 อัตราการดูดซึมน้ำ.....	41
4.5 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง.....	43
4.6 คาร์บอนฟรุตพริ้นท์.....	44

4.7 การประเมินราคา.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ และตัวอย่างการคำนวณ.....	57
ภาคผนวก ข รูปการทดสอบ	74
ประวัติผู้เขียน.....	94



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของ RPC โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์ [2].....	4
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก [11].....	5
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C [6], [15]	8
ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย	15
ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมสำหรับการทดสอบผลกระทบของเถ้าลอย.....	16
ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมสำหรับการทดสอบผลกระทบของเส้นใยเหล็ก.....	17
ตารางที่ 7 ขนาด มาตรฐาน จำนวน และอายุของการทดสอบ.....	22
ตารางที่ 8 การต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่งตามมาตรฐาน ASTM C1202	28
ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนของวัสดุในสัดส่วนผสม	29
ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์ราคาของวัสดุในสัดส่วนผสม.....	30
ตารางที่ 11 หน่วยน้ำหนักของสัดส่วนผสมผลกระทบของเถ้าลอย (kg/m^3).....	34
ตารางที่ 12 หน่วยน้ำหนักของสัดส่วนผสมผลกระทบเส้นใยเหล็ก (kg/m^3).....	36
ตารางที่ 13 ผลการไหลแผ่ของแต่ของทุกสัดส่วนผสม	58
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดดั้งแสดงใน.....	59
ตารางที่ 15 ผลการทดสอบดึงแบบผ่าซีก.....	63
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด.....	64
ตารางที่ 17 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ.....	66
ตารางที่ 18 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง.....	67

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	12
รูปที่ 2 ซีลิกาฟุ่มแบบไม่ควบแน่น	12
รูปที่ 3 แก้วลอยชั้นคุณภาพ F.....	13
รูปที่ 4 ทราเยมน้ำซีแบบไม่คัดขนาด.....	13
รูปที่ 5 หินขนาดระบุ 3/8 in.....	13
รูปที่ 6 เส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว	14
รูปที่ 7 เส้นใยเหล็กแบบคละขนาด	14
รูปที่ 8 น้ำประปา.....	14
รูปที่ 9 สารลดน้ำพิเศษ	15
รูปที่ 10 การเตรียมแบบหล่อ	18
รูปที่ 11 การเตรียมส่วนผสมแห้ง	18
รูปที่ 12 การเตรียมส่วนผสมเหลว	18
รูปที่ 13 การผสมของแห้ง และของเหลวในครั้งแรก	19
รูปที่ 14 การผสมหินในครั้งแรก	19
รูปที่ 15 การผสมของแห้ง และของเหลวในครั้งหลัง	19
รูปที่ 16 การผสมหินในครั้งหลัง	20
รูปที่ 17 การผสมเส้นใยเหล็ก.....	20
รูปที่ 18 การทดสอบการไหลแผ่	20
รูปที่ 19 การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ (ซ้าย) การหุ้มแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติก (ขวา).....	21
รูปที่ 20 การบ่มตัวอย่างในน้ำ.....	21
รูปที่ 21 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	23

รูปที่ 22 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก	24
รูปที่ 23 การทดสอบกำลังรับแรงดัด	25
รูปที่ 24 ตัวอย่างการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ.....	26
รูปที่ 25 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของการดูดซึมน้ำกับรากที่สองของวินาที	26
รูปที่ 26 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง	28
รูปที่ 27 การไหลผ่านของสัดส่วนผสมโดยที่ (a) FA40MST0.5, (b) FA40MST1 และ (c) FA40MST2	31
รูปที่ 28 กำลังรับแรงอัดของ RCP ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2% ...	32
รูปที่ 29 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของ RCP ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน	32
รูปที่ 30 กำลังรับแรงอัดของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบคละขนาด ปริมาณต่างกัน.....	34
รูปที่ 31 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบ คละขนาดปริมาณต่างกัน	35
รูปที่ 32 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็ก ปริมาณ 2%	36
รูปที่ 33 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน.....	37
รูปที่ 34 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบ คละขนาดปริมาณต่างกัน	37
รูปที่ 35 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกัน.....	38
รูปที่ 36 กำลังรับแรงดัดของ RCP ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2% ...	39
รูปที่ 37 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน.....	40
รูปที่ 38 กำลังรับแรงดัดของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบคละขนาด ปริมาณต่างกัน.....	40
รูปที่ 39 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกัน.....	41
รูปที่ 40 อัตราการดูดซึมน้ำของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%	41

รูปที่ 41 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งของของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%.....	43
รูปที่ 42 ตัวอย่างหลังการทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่ง.....	44
รูปที่ 43 คาร์บอนฟรุตพริ้นท์ของ RPC ของทุกสัดส่วนผสม.....	44
รูปที่ 44 การประเมินราคาของทุกสัดส่วนผสม	45
รูปที่ 45 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่อายุ 28 วัน.....	68
รูปที่ 46 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของสัดส่วนผสม FA20MST2 ที่อายุ 28 วัน.....	68
รูปที่ 47 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่อายุ 28 วัน.....	69
รูปที่ 48 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของสัดส่วนผสม FA60MST2 ที่อายุ 28 วัน.....	69
รูปที่ 49 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่อายุ 28 วัน.....	70
รูปที่ 50 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA20MST2 ที่อายุ 28 วัน	70
รูปที่ 51 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่อายุ 28 วัน	71
รูปที่ 52 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA60MST2 ที่อายุ 28 วัน	71
รูปที่ 53 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่อายุ 28 วัน.....	72
รูปที่ 54 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA20MST2 ที่อายุ 28 วัน.....	72
รูปที่ 55 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่อายุ 28 วัน.....	73

รูปที่ 56 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA60MST2 ที่อายุ 28 วัน.....	73
รูปที่ 57 ตัวอย่างการวัดค่าทดสอบการไหลแผ่.....	75
รูปที่ 58 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ ...	75
รูปที่ 59 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ ...	76
รูปที่ 60 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ ...	76
รูปที่ 61 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ.	77
รูปที่ 62 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ.	77
รูปที่ 63 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	78
รูปที่ 64 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	78
รูปที่ 65 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	79
รูปที่ 66 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	79
รูปที่ 67 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	80
รูปที่ 68 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	80
รูปที่ 69 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	81
รูปที่ 70 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	81
รูปที่ 71 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	82
รูปที่ 72 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	82
รูปที่ 73 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	83
รูปที่ 74 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	83
รูปที่ 75 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	84

รูปที่ 76 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	84
รูปที่ 77 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	85
รูปที่ 78 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	85
รูปที่ 79 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	86
รูปที่ 80 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	86
รูปที่ 81 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	87
รูปที่ 82 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	87
รูปที่ 83 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	88
รูปที่ 84 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	88
รูปที่ 85 ตัวอย่าง FA60MSR2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	89
รูปที่ 86 ตัวอย่าง Ref.SST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	89
รูปที่ 87 ตัวอย่าง FA20MST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	90
รูปที่ 88 ตัวอย่าง FA40MST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	90
รูปที่ 89 ตัวอย่าง FA60MST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	91
รูปที่ 90 ตัวอย่าง Ref.SST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ	91

รูปที่ 91 ตัวอย่าง FA20MST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ.....	92
รูปที่ 92 ตัวอย่าง FA40MST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ.....	92
รูปที่ 93 ตัวอย่าง FA60MST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ.....	93



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement), ทราย (Sand, S), มวลรวม (Aggregate) และน้ำ (Water, W) มีคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดดีแต่กำลังรับแรงดึงน้อย จึงนำเหล็กมาเสริมกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งเหล็กเป็นวัสดุราคาสูงทำให้คอนกรีตเป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตเสริมเหล็ก [1] ปัจจุบันมีการพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษชนิดหนึ่งขึ้นมีชื่อเรียกว่า รีแอคทีฟพาวเดอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC) RPC เป็นคอนกรีตที่กำลังรับแรงอัดสูงเป็นพิเศษโดยกำลังรับแรงอัดประมาณ 200-800 เมกะปาสคาล (MPa) มากกว่าคอนกรีตทั่วไป (Normal Strength Concrete, NSC) ที่มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 18-40 MPa ในส่วนกำลังรับแรงดึงของ RPC มีค่าประมาณ 40-140 MPa [2], [3] และมีความทนทานมากกว่าคอนกรีตชนิดอื่น ดังนั้น RPC จึงเป็นคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างต่าง ๆ

RPC มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ และน้ำในอัตราส่วนต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizers, SP) ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume, SF) ทราย หรือมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) เพื่อลดช่องว่างภายในคอนกรีตเพิ่มความหนาแน่นมากขึ้น [4] และเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber, STF) เพื่อลดความเปราะรวมถึงเพิ่มความเหนียวให้คอนกรีต การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงของ RPC ประมาณ 935 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) อาจส่งผลต่อความร้อนของคอนกรีตซึ่งลดความชุ่มชื้นก่อให้เกิดการหดตัวที่เร็วเกินไป และรอยร้าวขนาดเล็ก [5] ปูนซีเมนต์ และเส้นใยเหล็กเป็นวัสดุหลักที่ทำให้ต้นทุนการผลิตของ RPC สูง การใช้วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน และใช้เส้นใยเหล็กแบบคละขนาดก็มีส่วนช่วยลดต้นทุนในการผลิตรวมถึงการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

เถ้าลอย (Fly Ash, FA) คือ วัสดุปอซโซลานที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า จากมาตรฐาน ASTM C618 ผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 สามารถแบ่งเถ้าลอยได้ 2 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่มี FA ชั้นคุณภาพ C มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า FA ชั้นคุณภาพ F ซึ่ง FA ทั้ง 2 ชั้นคุณภาพ สามารถช่วยเสริมกำลังรับแรงอัดให้สูงขึ้น หรือใกล้เคียงกับคอนกรีตเดิม และเพิ่มความต้านทานต่อการโจมตีของซัลเฟต [6] จากงานวิจัยการแทนที่ปูนซีเมนต์ใน RPC (มีมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ) ด้วย FA ชั้นคุณภาพ C ในปริมาณสูง (0%, 20%, 40%, 60% โดยปริมาตร) สำหรับการบ่มแบบมาตรฐาน เสริมด้วยเส้นใยเหล็กขนาดเดียว (Single Size Steel Fiber, SST) โดยที่ RPC มีมวลรวมเป็นอะลูมิเนียม

ขนาด 0-3 มิลลิเมตร (mm) เทียบกับส่วนผสมควบคุม FA 0% พบว่าในการแทนที่ปูนซีเมนต์ของปริมาณ FA 20% และ FA 40% มีค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดมากกว่า หรือใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุม โดย FA 20% ให้ค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 205 และ 30 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณ FA มากกว่า 40% กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดลดลงจากส่วนผสมควบคุม [7]

Ge et al. [8] ศึกษา RPC โดยปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วย SF ในปริมาณคงที่ 25% ร่วมกับ FA ในปริมาณต่างกัน (0%, 10%, 20% และ 30% โดยปริมาตร) ซึ่งขนาดมวลรวมขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 0.2 mm และสารลดน้ำพิเศษ สำหรับการบ่มแบบมาตรฐาน เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม FA 0% พบว่า FA 10% มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นสูงสุด และกำลังรับแรงดัดมีค่าประมาณ 125 และ 21 MPa ตามลำดับ เมื่อ FA มากกว่า 10% กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลงนอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.22 mm ยาว 13 mm ในปริมาณต่างกัน (0%, 0.5%, 1%, 2% โดยปริมาตร) ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ สำหรับการบ่มแบบมาตรฐาน พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็ก โดยเส้นใยปริมาณ 2% ให้กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดสูงสุดประมาณ 190 และ 28 MPa ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ความทนทาน และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) ของ RPC ที่มี FA ปริมาณสูงเสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบผสมขนาด (Mixed Size Steel Fiber, MST) จากงานวิจัยที่ผ่านมาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA ที่ 20% และ 40% ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับ RPC เดิมที่ไม่มีส่วนผสมของ FA ร่วมกับการเสริมด้วยเส้นใยเหล็กในปริมาณ 2% ส่งผลดีต่อความเหนียวของ RPC

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และความทนทานของรีแอ็คทีฟพาวเดอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณสูงแทนที่ปูนซีเมนต์เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบผสมขนาดเทียบกับ RPC เดิมที่ไม่มีเถ้าลอยในสัดส่วนผสม

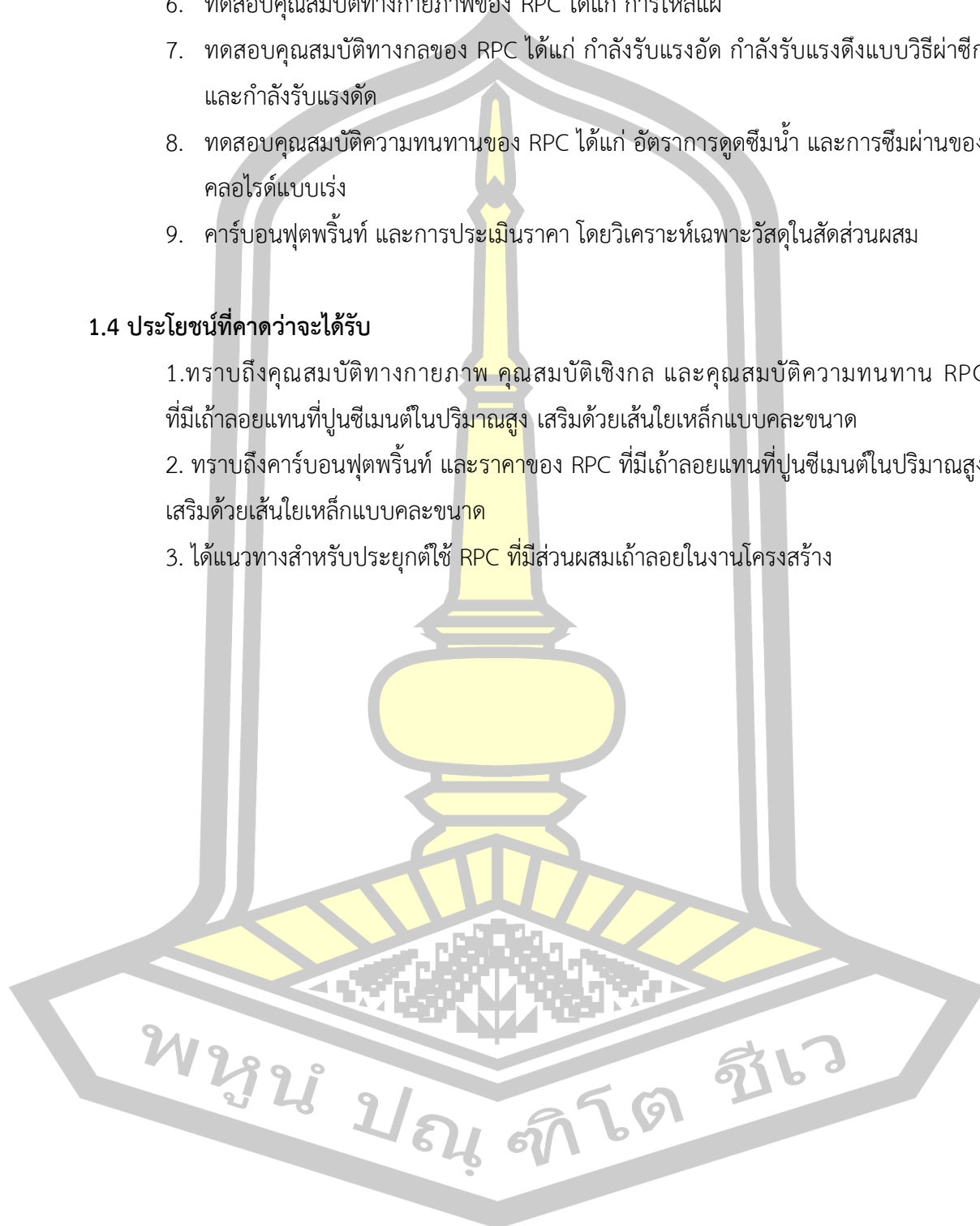
1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ปริมาณ 20%, 40%, และ 60%
2. เส้นใยเหล็กแบบผสมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18-0.35 mm ความยาว 12-14 mm ปริมาณ 0.5%, 1%, 2%
3. หินขนาด 3/8 in.
4. ตัวอย่างบ่มในน้ำ

5. ค่าการไหลแผ่เฉลี่ยประมาณ 200-250 mm สำหรับเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%
6. ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของ RPC ได้แก่ การไหลแผ่
7. ทดสอบคุณสมบัติทางกลของ RPC ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบวิธีผ่าซีก และกำลังรับแรงดัด
8. ทดสอบคุณสมบัติความทนทานของ RPC ได้แก่ อัตราการดูดซึมน้ำ และการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง
9. คาร์บอนฟุตพริ้นท์ และการประเมินราคา โดยวิเคราะห์เฉพาะวัสดุในสัดส่วนผสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติความทนทาน RPC ที่มีเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาด
2. ทราบถึงคาร์บอนฟุตพริ้นท์ และราคาของ RPC ที่มีเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาด
3. ได้แนวทางสำหรับประยุกต์ใช้ RPC ที่มีส่วนผสมเกล็ดลอยในงานโครงสร้าง



บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 รีแอคทีฟพาวเดอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC)

ในปี ค.ศ. 1965 ที่สหรัฐอเมริกา ได้คิดค้นคอนกรีตกำลังสูง โดยนำไปใช้ในงานก่อสร้างทางหลวงรวมถึงโครงสร้างที่อยู่อาศัยฝั่ และโครงสร้างสะพานที่มีช่วงค่อนข้างยาว โดย American Concrete Institute (ACI) ได้มีการบัญญัติความหมายของคอนกรีตกำลังสูงโดย RPC ก็เป็นหนึ่งในคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (Ultra High Performance Concrete) [9]

RPC คือ วัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นตัวประสานส่วนผสมต่าง ๆ ให้เข้ากัน โดยการทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด รวมถึงปรับปรุงในแต่ละส่วน เช่น ความหนาแน่นโดยการอัดแน่นส่วนผสมให้แน่นที่สุด โครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อเพิ่มความคงทนของอายุการใช้งานในระยะยาว ความเหนียวให้ดีขึ้นโดยการผสมเส้นใยเหล็ก เป็นต้น งานวิจัยของ RPC นั้นเริ่มต้นจาก HDR Engineer Inc. ได้ทำการศึกษาตั้งแต่ ค.ศ. 1990 หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1995 ได้มีผลการพัฒนา RPC ดังแสดงในตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของ RPC โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์ [2]

วัสดุผสม	RPC 200				RPC 800	
	ไม่มีเส้นใยเหล็ก		มีเส้นใยเหล็ก		ไม่มีผงเหล็ก	มีผงเหล็ก
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	1	1	1	1	1	1
ซิลิกาฟูม	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
ทรายขนาด 150-600 ไมโครเมตร (μm)	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
ควอตซ์บด $d_{50} = 10 \mu\text{m}$	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
สารลดน้ำพิเศษ	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
เส้นใยเหล็กยาว 12 mm	-	-	0.175	0.175	-	-
เส้นใยเหล็กขนาด 3 mm	-	-	-	-	0.63	0.63
ผงเหล็กขนาด $800 \mu\text{m}$	-	-	-	-	-	1.49
น้ำ	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19

วัสดุผสม	RPC 200				RPC 800	
	ไม่มีเส้นใยเหล็ก		มีเส้นใยเหล็ก		ไม่มีผงเหล็ก	มีผงเหล็ก
การอัดความดัน (MPa)	-	-	-	-	50	50
อุณหภูมิ (°C)	20	20	20	90	250-400	250-400

จากการทดสอบพบว่า RPC 200 มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 170-230 MPa และค่ากำลังรับแรงดัดอยู่ในช่วง 30-60 MPa โดยที่ RPC 800 ไม่มีผงเหล็กเป็นส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 490-680 MPa ส่วน RPC ที่ใช้ผงเหล็กเป็นส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงอยู่ระหว่าง 650-810 MPa ในขณะที่ RPC 800 มีกำลังรับแรงดัดอยู่ระหว่าง 45-141 MPa ซึ่งมากกว่าคอนกรีตทั่วไป (Normal Strength Concrete, NSC) ที่มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 18-40 MPa ส่วนกำลังรับแรงดัดของ RPC ประมาณ 40-140 MPa [10] อย่างไรก็ตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงของ RPC ประมาณ 935 kg/m³ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป อาจส่งผลต่อความร้อนของคอนกรีตทำให้ความชุ่มชื้นลดลงก่อให้เกิดการหดตัวที่เร็วเกินไป และรอยร้าวขนาดเล็ก [5] รวมถึงต้นทุนสูงจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากของ RPC

2.1.1 ส่วนประกอบของ RPC

1. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) มีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594-2556 สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้โดยเนื้อคอนกรีตมีความแข็งแรงทนทาน เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ต้องการกำลังรับแรงอัดสูงรวมถึงทนต่อการกัดกร่อน และหลุดร่อน นอกจากนี้ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2 [11]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก [11]

คอนกรีตสด	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
การอุ้มน้ำ	เทียบเท่ากัน	เทียบเท่ากัน
ความต้องการน้ำ	น้อยกว่า	มากกว่า
การยุบตัวช่วงต้น	มากกว่า (12-17%)	น้อยกว่า
การรักษาค่าความสามารถการยุบตัว	เทียบเท่ากัน	เทียบเท่ากัน

	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
ระยะเวลาการก่อตัว	ใกล้เคียงกัน	ใกล้เคียงกัน
การเข้มน้ำที่ผิวหน้า	น้อยกว่า	มากกว่า
คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว		
กำลังรับแรงอัด	เท่ากัน	เท่ากัน
คาร์บอนชั้น	ลึกกว่า (1 mm)	ตื้นกว่า
ความต้านทานซัลเฟตและคลอไรด์	เทียบเท่ากัน	เทียบเท่ากัน
การหดตัว (แบบแห้งและแบบออโตจีเนียส)	ต่ำกว่า	สูงกว่า
การทำปฏิกิริยาระหว่างต่างและมวลรวม	เทียบเท่ากัน	เทียบเท่ากัน
การต้านทานการขีดสีสึกกร่อน	เทียบเท่า หรือ สูงกว่าเล็กน้อย	เทียบเท่า หรือ ต่ำกว่าเล็กน้อย

2. ซิลิกาฟุม (Silica Fume, SF) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันพบว่าซิลิกาฟุมนิยมใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของคอนกรีต เนื่องจากมีอนุภาคเป็นทรงกลมละเอียดขนาดเล็กช่วยลดช่องว่างเพิ่มความหนาแน่นของคอนกรีต แต่มีความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น จึงมักใช้ร่วมการสารลดน้ำพิเศษ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ซึ่งเป็นผลดีสำหรับความแข็งแรงของคอนกรีต [9] โดยองค์ประกอบหลักของซิลิกาฟุม คือ SiO_2

3. หทรายแม่น้ำ (River Sand, S) เป็นวัสดุผสมละเอียด (Fine Aggregate) ที่นิยมใช้ในงานผลิตคอนกรีต โดยเกิดจากการสึกกร่อน และเสียดสีของหินตามธรรมชาติภายใต้การไหลของน้ำในแม่น้ำ มีลักษณะเป็นเม็ดทรายละเอียดทรงกลมมนสามารถแทรกตัว และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อคอนกรีต ทรายจะทำหน้าที่ร่วมกับปูนซีเมนต์ในการเติมเต็มช่องว่างลดปริมาณรูพรุนภายในส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [9]

4. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizers, SP) ประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต (Polycarboxylate) เป็นสารเคมีที่ใช้ในงานคอนกรีตเพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมได้ถึง 12-25% โดยไม่ลดกำลังรับแรงอัด และการซึมผ่านของน้ำช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลตัว [12] จึงเหมาะสำหรับการผลิตคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงแต่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ

5. เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber, STF) คือ วัสดุที่ทำจากเส้นลวดเหล็กที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น ทำให้เกิดเป็นเส้นใยเหล็กที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนต่ำ เมื่อใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตทำให้มีความแข็งแรง และความเหนียวเพิ่มขึ้นรวมถึงลดรอยร้าวจากการหดตัวของคอนกรีต

2.1.2 คุณสมบัติเชิงกลของ RPC

Ge et al. [8] ศึกษาผลกระทบของปริมาณ STF (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.22 mm ยาว 13 mm) ในปริมาณต่างกัน (0%, 0.5%, 1% และ 2%) ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ โดยปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มในปริมาณคงที่ 25% สำหรับการบ่มแบบมาตรฐาน เทียบกับส่วนผสมควบคุม (STF 0%) ที่มีกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดประมาณ 123 และ 22 MPa ตามลำดับ มีผลทดสอบดังนี้

1. กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) จากการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของ RPC มีความสัมพันธ์กับปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ STF 0.5% มีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 157 MPa ซึ่งมากกว่าส่วนผสมควบคุม โดยปริมาณ STF 1% มีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 175 MPa และเมื่อเพิ่มปริมาณ STF 2% ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดมีค่าประมาณ 193 MPa

2. กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) พบว่ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเหล็ก ซึ่งเหมือนกับกำลังรับแรงอัดโดยที่ STF 0.5% กำลังรับแรงดัดมีค่าประมาณ 25 MPa มากกว่าส่วนผสมควบคุม ปริมาณ STF 1% กำลังรับแรงดัดมีค่าประมาณ 28 MPa และปริมาณ STF 2% ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นสูงสุดมีค่าประมาณ 31 MPa

ความแข็งแรงของ RPC เพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยเหล็กที่กระจายช่วยป้องกันการแตกร้าว ซึ่งเป็นส่วนเสริมให้กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น สำหรับ RPC ที่ไม่มีเส้นใยเหล็ก รอยร้าวจะพัฒนาอย่างรวดเร็วตามส่วนต่อประสานที่อ่อนแอก่อให้เกิดความเสียหายต่อคอนกรีต งานวิจัยนี้จึงแนะนำปริมาณ STF ที่ 2% เหมาะสมกับการใช้งาน

นอกจากการใช้ STF ที่ความยาวเท่ากันงานวิจัยของ Wu et al. [13] ได้ศึกษาการผสมระหว่าง STF ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm และความยาวแตกต่างกันสองขนาด คือ 6 mm และ 13 mm ในช่วงปริมาณ 0%-2% โดยปริมาตร พบว่าคอนกรีตที่มีการผสมของ STF ช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดให้เพิ่มขึ้นได้ 20%-40% โดยส่วนผสมที่มี STF ขนาด 13 mm ปริมาณ 1.5% รวมกับขนาด 6 mm ปริมาณ 0.5% ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 144 MPa ซึ่งมากกว่าส่วนผสมที่มี STF ความยาว 6 mm ปริมาณ 2% และ STF ความยาว 13 mm ปริมาณ 2% ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 121 MPa และ 134 MPa ตามลำดับ

2.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash, FA) เป็นเถ้าถ่านหินชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ในกระบวนการนี้พบเถ้าลอยในปริมาณที่สูงถึง 90% โดยน้ำหนักของปริมาณเถ้าถ่านหินทั้งหมด เนื่องจากองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) จึงนิยมนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ หรือวัสดุก่อสร้าง [14] ซึ่งเถ้าลอยจะแบ่งเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ F และ C ตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังนี้

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่า 70%

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 50%-70% ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง โดยมีองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั้งสองชั้นคุณภาพ ดังแสดงในตารางที่ 3 [6], [15]

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C [6], [15]

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)			
	เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C [6]	เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C [15]	เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F [6]	เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F [15]
SiO_2	46.38	29.80	58.58	55.00
Al_2O_3	13.90	16.80	23.40	18.37
Fe_2O_3	8.26	6.63	6.97	10.77
CaO	15.10	27.00	1.55	6.15
MgO	6.68	6.02	2.76	1.45
Na_2O	2.13	4.07	0.46	1.20
SO_3	4.26	2.57	0.45	1.32
K_2O	2.78	0.49	4.11	2.73
LOI	0.22	-	0.20	-

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F แต่เถ้าลอยทั้ง 2 ชั้นคุณภาพ ช่วยเสริมกำลังรับแรงอัดให้สูงขึ้น หรือใกล้เคียงกับคอนกรีตเดิมที่ไม่มี FA ในส่วนผสมรวมถึงความต้านทานต่อการโจมตีของซัลเฟต [6]

2.3 RPC ผสมเถ้าลอย

ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานถูกใช้ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นการนำวัสดุที่ไม่ได้ใช้มาประยุกต์ให้เหมาะสมกับงานโครงสร้างเพื่อลดต้นทุน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยของ Yigiter et al. [16] ได้ศึกษา RPC ที่ปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วย FA ชั้นคุณภาพ C หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) ที่ 0%, 20%, 40% และ 60% โดยที่ปริมาณ SF คงที่ (35% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) รวมกับควอชขนาด 0-3 mm สารลดน้ำพิเศษ และเส้นใยเหล็กเคลือบทองเหลืองยาว 6 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA หรือ GGBFS จะลดกำลังรับแรงอัดของ RPC เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (FA 0% หรือ GGBFS 0%) แต่ส่วนผสมของ RPC ที่มี FA ไม่เกิน 40% ของการแทนที่ปูนซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 200 MPa รวมถึงส่วนผสมของ RPC ที่มี FA 60% ในส่วนผสม

Yigiter et al. [7] ได้ศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ใน RPC (มีมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ) ด้วย FA ชั้นคุณภาพ C ในปริมาณสูง (0%, 20%, 40%, 60% โดยปริมาตร) สำหรับการบ่มแบบมาตรฐาน โดยที่ RPC มีมวลรวมเป็นอะลูมิเนียมขนาด 0-3 mm เทียบกับส่วนผสมควบคุม คือ FA 0% มีค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 199 MPa และ 28 MPa ตามลำดับ พบว่าการแทนที่ FA 20% มีกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 205 MPa และ 30 MPa ตามลำดับ รองลงมา คือ การแทนที่ FA 40% มีกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 197 MPa และ 29 MPa ตามลำดับ การแทนที่ FA 60% กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 189 MPa และ 25 MPa ตามลำดับ ในของส่วนผสม RPC ที่มีหินแกรนิตขนาด 1-3 mm กับควอตซ์ขนาด 0-1 mm เป็นมวลรวม โดยมีส่วนผสมควบคุม คือ FA 0% มีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 180 MPa และกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 29 MPa การแทนที่ FA 20% กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดมีค่าประมาณ 185 MPa และกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 29 MPa รองลงมา คือ การแทนที่ FA 40% กำลังรับแรงอัดมีค่าประมาณ 175 MPa และกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 28 MPa ค่ากำลังน้อยที่สุด คือ การแทนที่ FA 60% กำลังรับแรงอัดมีค่าประมาณ 150 MPa และกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 27 MPa

Ge et al. [8] ได้ศึกษา RPC (ไม่มีมวลรวมหยาบ) โดยปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่ม ในปริมาณคงที่ 25% รวมกับ FA ในปริมาณต่างกัน (0%, 10%, 20% และ 30% โดยปริมาตร) ซึ่งขนาดมวลรวมใหญ่สุดไม่เกิน 0.2 mm และสารลดน้ำพิเศษ สำหรับการบ่มแบบมาตรฐาน เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม FA 0% และ ซิลิกาฟุ่ม 25% มีกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดประมาณ 123 MPa และ 22 MPa ตามลำดับ พบว่า FA 10% มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด และกำลังรับแรงดัดลดลงมีค่าประมาณ 125 MPa และ 21 MPa ตามลำดับ รองลงมา คือ FA 20% ทั้งกำลัง

รับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดลดลงมีค่าประมาณ 117 MPa และ 18 MPa ตามลำดับ และค่ากำลังน้อยที่สุด คือ FA 30% มีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดประมาณ 109 MPa และ 17 MPa ตามลำดับนอกจากนี้ด้านความทนของ RPC ก็เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการตรวจสอบเพื่อให้มีความสามารถในระยะยาว โดยการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มโดย FA 30% มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด

Sohail et.al [17] ศึกษาคอนกรีตกำลังสูงพิเศษ (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) ปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วย FA 15% รวมกับมวลละเอียดย และสารลดน้ำพิเศษ โดยไม่มีเส้นใยเหล็กในส่วนผสม เมื่อเทียบกับคอนกรีตกำลังปกติ (Normal Strength Concrete, NSC) และคอนกรีตกำลังสูง (High-Performance Concrete, HPC) พบว่าในช่วง Initial ของอัตราการดูดซึมน้ำ UHPC มีอัตราการมีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับ $10.0 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ รองลงมา คือ HPC มีค่าเท่ากับ $23.0 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ และ NSC มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดเท่ากับ $40.0 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ ในช่วง Secondary UHPC ยังคงมีอัตราการมีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำสุดประมาณ $1.5 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ รองลงมา คือ HPC มีค่าประมาณ $2.4 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ และ NSC มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดประมาณ $15.7 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า UHPC นั้นมีโครงรูพรุนที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับส่วนผสมคอนกรีตทั่วไปรวมถึงคอนกรีตกำลังสูง แนวโน้มนี้ยังมีส่วนคล้ายกับการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดยที่ UHPC มีการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่งต่ำสุด รองลงมา คือ HPC และ NC มีการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่งมากที่สุด โดยมีค่าประมาณ 48, 120 และ 5,148 coulombs ตามลำดับ

Muhsin และ Fawzi [18] ศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของ RPC ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0%, 8%, 12% และ 16% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เสริมด้วยเส้นใยเหล็ก 1% โดยปริมาตร รวมกับซิลิกาฟุ่ม และมวลรวมละเอียด พบว่าอัตราส่วนเถ้าลอยที่ 8% ส่งผลดีต่อคุณสมบัติเชิงสูงสุด โดยกำลังรับแรงอัดของการทดสอบที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 75.7, 96.5 และ 115 MPa ตามลำดับ โดยกำลังอัดลดลงตามปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น แนวโน้มนี้ยังพบในความสามารถแรงดัดที่อัตราส่วนเถ้าลอย 8% ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย เมื่อเพิ่มระยะเวลาการทดสอบกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นที่อายุ 7, 28 และ 90 มีค่าประมาณ 6.9, 9.4 และ 10.4 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ความหนาแน่นของ RPC เพิ่มขึ้นเมื่อมีเถ้าลอยในส่วนผสม

2.4 ก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) คือ ก๊าซที่สามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดจากพื้นผิวโลก และกักเก็บความร้อนในบรรยากาศโลกทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ปรากฏการณ์นี้เป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) และภาวะโลกร้อน (Global Warming) โดยชนิดของก๊าซหลักได้แก่ [19]

1. คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศมากที่สุด สามารถอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณ 200 ปี เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล หรือกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การผลิตปูนซีเมนต์
2. มีเทน (CH_4) เป็นก๊าซที่กักเก็บความร้อนได้มากกว่า CO_2 ถึง 84 เท่า สามารถอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณ 12 ปี เกิดจากการทำปศุสัตว์ หรือการจัดการของเสียด้วยการฝังกลบ
3. ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) สามารถก่อภาวะเรือนกระจกได้มากกว่า CO_2 ถึง 260 เท่า โดยอยู่ในชั้นบรรยากาศ 100 ปี เกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน หรือการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในภาคเกษตรกรรม
4. ก๊าซฟลูออรีเนต (Fluorinated Gases) เป็นก๊าซสังเคราะห์ เช่น HFC_s , PFC_s , SF_6 , NF_3 และ CFC_s เป็นก๊าซที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกได้กว่า CO_2 ถึง 1,000 เท่า รวมถึงมีอายุที่ยาวนานได้มากถึง 50,000 ปี เกิดจากภาคอุตสาหกรรมเป็นหลัก

2.4.1 คาร์บอนฟุตพริ้นท์

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) คือ การประเมินผลกระทบของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่เกิดจากกิจกรรมของบุคคล องค์กร ผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งที่ทำให้ก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณมากน้อยเพียงใด แสดงในรูปของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เช่น กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($\text{kg CO}_2\text{e}$) หรือตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($\text{t CO}_2\text{e}$) คาร์บอนฟุตพริ้นท์ในไทยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ คาร์บอนฟุตพริ้นท์อุตสาหกรรม (Carbon Footprint for Organization: CFO) และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint of Product: CFP) [20]

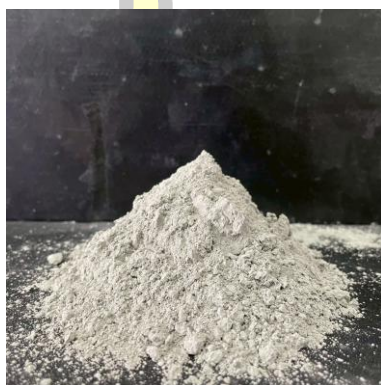
พหุ ประสิทธิภาพ

บทที่ 3

วิธีการ และแผนการดำเนินการศึกษา

3.1 วัสดุสำหรับการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement, C) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594-2556 ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

2. ซิลิกาฟุ้งแบบไม่ควบแน่น (Undensified Silica Fume, SF) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 2 ซิลิกาฟุ้งแบบไม่ควบแน่น

3. เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F (Class F Fly Ash, FA) ตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 3 เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F

4. ทรายแม่น้ำซีแบบไม่คัดขนาด (Unscreened Chi River Sand, S) คัดแยกเศษวัสดุปนเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ทรายแม่น้ำซีแบบไม่คัดขนาด

5. หิน (Coarse Aggregate, CA) ขนาดระบุ 3/8 in. ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 หินขนาดระบุ 3/8 in.

6. เส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว (Single Size Steel Fiber, SST) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 mm ความยาว 6 mm ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว

7. เส้นใยเหล็กแบบคละขนาด (Mixed Size Steel Fiber, MST) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18-0.35 mm ความยาว 12-14 mm ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 เส้นใยเหล็กแบบคละขนาด

8. น้ำ (Water, W) ใช้น้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 น้ำประปา

9. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, SP) ประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 สารลดน้ำพิเศษ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)		
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	ซิลิกาฟูมแบบไม่ ควบแน่น	เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F
SiO ₂	13.32	94.80	53.03
Al ₂ O ₃	2.73	0.15	16.97
Fe ₂ O ₃	3.54	0.03	6.22
CaO	74.37	0.88	15.69
MgO	0.89	0.70	0.78
Na ₂ O	0.28	0.20	0.35
SO ₃	0.50	0.96	4.09
K ₂ O	0.49	1.98	1.27
TiO ₂	0.26	-	0.98
LOI	0.12	0.01	0.01

3.2 สัดส่วนผสม

เพื่อศึกษา RPC ที่มีเถ้าลอยปริมาณสูงแทนที่ปูนซีเมนต์เสริมด้วยเส้นใยเหล็ก โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 40%-80% เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ในอัตราส่วน 20%-60% เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18-0.35 mm ความยาว 12-14 mm) ปริมาณ 2% โดยปริมาตร โดยชื่อสัดส่วนผสม FA20MST2 หมายความว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยอัตราส่วน 20% เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดปริมาณ 2% ดังแสดงในตารางที่ 5 สำหรับ RPC แบบดั้งเดิมที่ไม่มีเถ้าลอยเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณ 100% เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ปริมาณ 0% เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 mm ความยาว 6 mm) ปริมาณ 2% โดยปริมาตร ใช้ชื่อสัดส่วนผสม Ref.SST2 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมสำหรับการทดสอบผลกระทบของเถ้าลอย

Materials	Ratio to Cement			
	Ref.SST2	FA20MST2	FA40MST2	FA60MST2
C	1.000	0.800	0.600	0.400
SF	0.350		0.08	
FA	-	0.200	0.400	0.600
S	1.10		0.520	
CA	-		0.480	
SST	0.170		-	
MST	-		0.160	
W	0.230		0.200	
SP	0.010		0.040	
Binder (C, SF, FA)	1.350		1.080	
SP Demand (%)	0.001		0.002	

* หมายเหตุ SP Demand (%) = $\frac{\left(\frac{M_{SP, Solid}}{M_{Binder}}\right)}{C} \times 100$

นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของเส้นใยเหล็กของ RPC โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 60% แก้วลอยชั้นคุณภาพ F ในอัตราส่วน 40% เสริมด้วยเส้นใยเหล็ก แบบคละขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18-0.35 mm ความยาว 12-14 mm) ปริมาณ 0.5%, 1% และ 2% โดยปริมาตร โดยซื้อสัดส่วนผสม FA40MST0.5 หมายความว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย แก้วลอยอัตราส่วน 40% เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาด 0.5% ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมสำหรับการทดสอบผลกระทบของเส้นใยเหล็ก

Materials	Ratio to Cement		
	FA40MST0.5	FA40MST1	FA40MST2
C	0.600		
SF	0.080		
FA	0.400		
S	0.520		
CA	0.480		
SST	-		
MST	0.040	0.080	0.160
W	0.200		
SP	0.040		
Binder (C, SF, FA)	1.080		
SP Demand (%)	0.002		

$$\text{*หมายเหตุ SP Demand (\%)} = \frac{\left(\frac{M_{SP, Solid}}{M_{Binder}} \right)}{C} \times 100$$

3.3 ขั้นตอนการผสม

1. เตรียมแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm สำหรับส่วนผสมที่ไม่มีหินคือ Ref.SST2 และ 100x100x100 mm สำหรับส่วนผสมที่มีหิน ได้แก่ FA20MST2, FA40MST0.5, FA40MST1, FA40MST2 และ FA60MST2 ที่มีหินในส่วนผสม กรณีการทดสอบกำลังรับแรงอัด แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm กรณีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก อัตราการดูดซึมน้ำ และการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง แบบหล่อปริซึมขนาด 75X75X280 mm สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเตรียมแบบหล่อ

2. เตรียมส่วนผสมแห้ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เถ้าลอยถ้ามีในสัดส่วนผสม และทรายลงในกระบะผสมให้เข้ากัน ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเตรียมส่วนผสมแห้ง

3. เตรียมส่วนผสมเหลว ได้แก่ น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ ผสมให้เข้ากัน ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การเตรียมส่วนผสมเหลว

4. นำส่วนผสมแห้งที่ผสมเข้ากันแล้วครึ่งหนึ่งใส่ในเครื่องผสม พร้อมทั้งส่วนผสมเหลวที่ผสมเข้ากันแล้วครึ่งแรกใส่ในเครื่องผสม จากนั้นผสมส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การผสมของแห้ง และของเหลวในครั้งแรก

5. สำหรับสัดส่วนผสมที่มีหิน ใส่หินครึ่งแรกลงในเครื่องผสมผสมต่อจนส่วนผสมเข้ากัน ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 การผสมหินในครั้งแรก

6. นำส่วนผสมแห้งที่เหลือใส่ในเครื่องผสม พร้อมกับส่วนผสมเหลวที่ผสมเข้ากันแล้วที่เหลือลงใส่ในเครื่องผสม จากนั้นผสมส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การผสมของแห้ง และของเหลวในครั้งสุดท้าย

7. สำหรับสัดส่วนผสมที่มีหิน ใส่หินที่เล็กลงในเครื่องผสมผสมต่อจนส่วนผสมเข้ากัน
 ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 การผสมหินในเครื่องหลัง

8. ขั้นตอนสุดท้ายนำเส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว หรือแบบคละขนาดที่เตรียมไว้ใส่ลงใน
 เครื่องผสมจากนั้นผสมส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 การผสมเส้นใยเหล็ก

9. นำส่วนผสมที่เข้ากันแล้วทดสอบการไหลแผ่ ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 การทดสอบการไหลแผ่

10. นำส่วนผสมทั้งหมดเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้ จากนั้นหุ้มด้วยแผ่นพลาสติก 24 ชั่วโมง
 ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ (ซ้าย) การหุ้มแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติก (ขวา)

11. เมื่อครบเวลา 24 ชั่วโมง ถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มน้ำตามอายุ
 การทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 การบ่มตัวอย่างในน้ำ

3.4 การทดสอบ

ขนาดตัวอย่าง มาตรฐาน จำนวน และอายุตัวอย่าง สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทาง
 กายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติความทนทาน สำหรับสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ขนาด มาตรฐาน จำนวน และอายุของการทดสอบ

การทดสอบ	อุปกรณ์ทดสอบ	ขนาด (mm)	มาตรฐาน	จำนวน	อายุ (วัน)
การไหลผ่าน		-	ASTM C1437 [21]	1 (ต่อส่วนผสม)	-
กำลังรับแรงอัด		50x50x50	ASTM C109 [22]	15	1, 3, 7, 28, 90
		100x100x100	BS 1881-116 [23]	15	1, 3, 7, 28, 90
กำลังรับแรงดึง		Ø100x200	ASTM C496 [24]	3	28
กำลังรับแรงดัด		75x75x280	ASTM C78 [25]	3	28
อัตราการดูดซึมน้ำ		Ø100x50 ตัดจาก Ø100x200	ASTM C1585 [26]	2	28
การซึมผ่านของคลอไรด์		Ø100x50 ตัดจาก Ø100x200	ASTM C1202 [27]	2	28

3.4.1 การทดสอบการไหลผ่าน

การทดสอบการไหลผ่าน (Flow Test) เป็นการทดสอบเพื่อแสดงความชันเหลว หรือ ความสม่ำเสมอของ RPC โดยใช้มาตรฐาน ASTM C1437 ในทดสอบ โดยใช้คอนกรีตในแบบทดสอบ ประมาณครึ่งหนึ่งของแบบ ใช้แท่งกระทุ้งกระทุ้งในแบบที่มีคอนกรีต 20 ครั้ง ใส่คอนกรีตเพิ่ม ลงไปในแบบอีกจนล้นแบบกระทุ้งในแบบต่อ 20 ครั้ง ปาดคอนกรีตให้เสมอขอบแบบสุดท้ายยก แบบหล่อขึ้น และปล่อยให้แท่นทดสอบการไหลผ่านตั้งกระทุ้ง เป็นจำนวน 25 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที (second, s) ค่าการไหลผ่านคิดเป็นร้อยละของการขยายตัวของคอนกรีตที่ฐาน เนื่องจาก RPC ที่ทดสอบเกินโตะทดสอบ จึงประยุกต์ใช้การทดสอบโดยหลังจากปาดคอนกรีตเสมอขอบแบบ

เสร็จแล้วทำการยกแบบขึ้นโดยตรง ที่ไม่มีระยะตกกระทบปล่อยให้ไหลอิสระเป็นเวลา 2 นาที (minute, min) แล้ววัดค่า 4 ค่า เป็นเหมือนรูปดอกจันเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยการไหลแผ่ของ RPC

3.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test) ใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm ตามมาตรฐาน ASTM C109 สำหรับสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่ไม่มีหิน และ 100x100x100 mm สำหรับส่วนผสมที่มีหินตามมาตรฐาน BS 1881-116 ทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน การทดสอบใช้เครื่อง UTM 300 T โดยใช้อัตราการให้แรงเท่ากับ 81,000 N/min สำหรับตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm และ 180,000 N/min สำหรับตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 mm ทดสอบกำลังรับแรงอัดจนตัวอย่างวิบัติแล้วบันทึกผลคำนวณหากำลังรับแรงอัดจากสมการที่ 3.1 และตัวอย่างการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 21

$$F = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ F = กำลังรับแรงอัด (N/mm^2 หรือ MPa)
 P = แรงกระทำสูงสุด (N)
 A = พื้นที่หน้าตัดด้านรับแรง (mm^2)



รูปที่ 21 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด $\varnothing 100 \times 200$ mm ทดสอบที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C496 ตัวอย่างมีการรองด้วยไม้อัดหนาประมาณ 3 mm การทดสอบใช้เครื่อง UTM 300 T โดยใช้อัตราการให้แรงเท่ากับ

113,000 N/min ทดสอบกำลังรับแรงดึงจนกว่าตัวอย่างจะวิบัติแล้วบันทึกผล คำนวณหาลังรับแรงดึงของ RPC จากสมการที่ 3.2 และตัวอย่างการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 22

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.2)$$

เมื่อ T = กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (N/mm^2)
 P = แรงกระทำสูงสุด (N)
 L = ความยาวของตัวอย่างทรงกระบอก (mm)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทรงกระบอก (mm)



รูปที่ 22 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

3.4.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength Test) ใช้ตัวอย่างทรงปริซึมขนาด $75 \times 75 \times 280$ mm ทดสอบที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C78 (Third-Point Loading) โดยระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองเท่ากับ 210 mm และตำแหน่งจุดรองรับทั้งสอง แบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน การทดสอบใช้เครื่อง UTM 300 T โดยใช้อัตราความเร็วเท่ากับ 1 mm/min ทดสอบกำลังรับแรงดัดจนกว่าตัวอย่างจะวิบัติแล้วบันทึกผล คำนวณหาลังรับแรงดัดของ RPC ในรูปของโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture, R) จากสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4 แล้วแต่กรณี ตัวอย่างการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 23

กรณีที่ 1) รอยร้าวของตัวอย่างแตกอยู่ในช่วงกลาง

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.3)$$

กรณีที่ 2) รอยร้าวของตัวอย่างไม่แตกอยู่ในช่วงกลาง

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3.4)$$

เมื่อ R = โมดูลัสการแตกร้าว (N/mm^2)

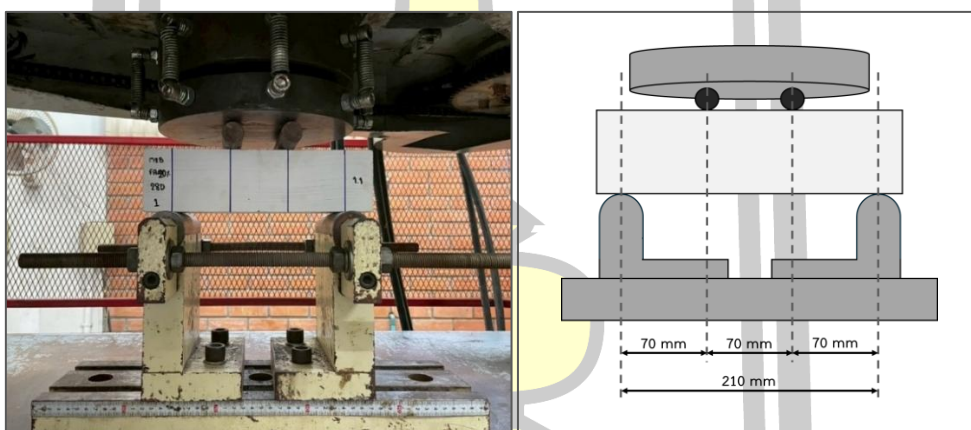
P = แรงกระทำสูงสุด (N)

L = ความยาวคาน (mm)

b = ความกว้างเฉลี่ยของคาน (mm)

d = ความลึกเฉลี่ยของคาน (mm)

a = ระยะเฉลี่ยของรอยแตกกับฐานรองรับคานด้านใกล้ที่สุด (mm)



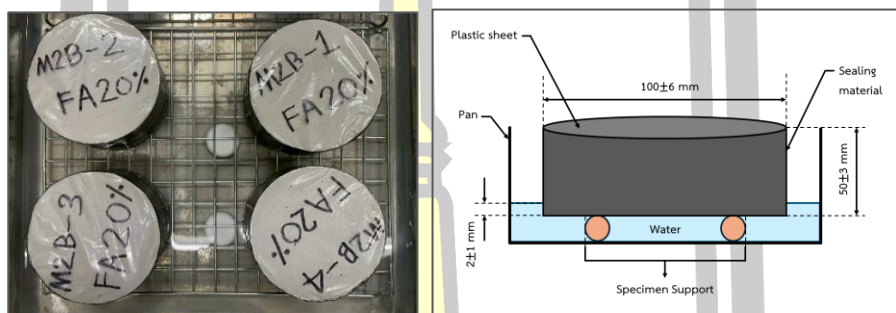
รูปที่ 23 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

3.4.5 การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ (Rate Water Absorption Test, RWAT) ตามมาตรฐาน ASTM C1585 เมื่อตัวอย่างปมครบอายุ 28 วัน นำตัวอย่างทรงกระบอกขนาด $\text{Ø}100 \times 200$ mm ตัดขนาดให้ได้ขนาด $\text{Ø}100$ ความสูง 50 ± 3 mm โดยการตัดทำการวัดจากส่วนกึ่งกลางของตัวอย่าง ทรงกระบอก จากนั้นอบตัวอย่างที่ตัดในตู้อบใช้อุณหภูมิ $50 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 วัน เมื่อครบกำหนดเก็บตัวอย่างแบบปิดสนิทอย่างน้อย 15 วัน ก่อนทดสอบหาโพสิยริเทนกันซึมทุกด้านที่ไม่สัมผัสน้ำ และปิดส่วนบนด้วยแผ่นพลาสติกพร้อมทั้งพันเทปดำบริเวณด้านข้างของตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ และหลังจากเริ่มทดสอบที่เวลา 1, 5, 10, 20 และ 30 นาที และที่เวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักต่อเมื่อครบ 24 ชั่วโมง เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน นำค่าที่ได้มาคำนวณหา ค่าการดูดซึมจากสมการที่ 3.5 และตัวอย่างการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 24

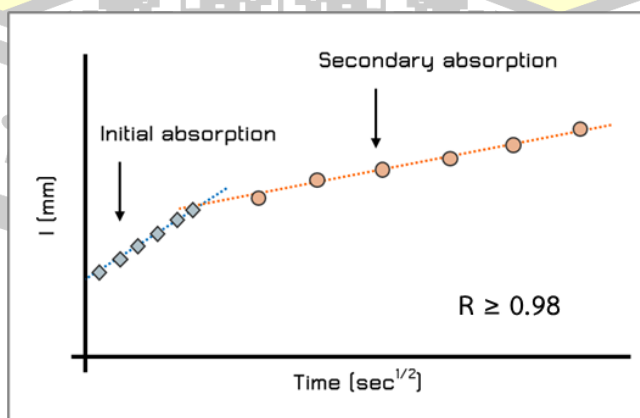
$$I = \frac{m_t}{A \times d} \quad (3.5)$$

เมื่อ I = การดูดซึมน้ำ (mm)
 m_t = การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เวลาใดๆ (g)
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างด้านสัมผัสกับน้ำ (mm²)
 d = ความหนาแน่นของน้ำ (g/mm³)



รูปที่ 24 ตัวอย่างการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

นำค่าการดูดซึมน้ำ I (mm) หาความสัมพันธ์กับรากที่สองของเวลา T (s^{1/2}) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นของเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient, R) และค่าอัตราการดูดซึมน้ำ (วิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธี Least Squares) โดยแบ่งการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์อัตราการดูดซึมน้ำ และอัตราการดูดซึมน้ำออกเป็นสองช่วง คือ ลำดับที่ 1 (Initial) คือ เวลาทดสอบ 1 นาที ถึง 6 ชั่วโมง และลำดับที่ 2 (Secondary) คือ เวลาทดสอบ 1-7 วัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการดูดซึมน้ำของช่วง Initial และ Secondary ต้องไม่น้อยกว่า 0.98 ตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ดังแสดงใน



รูปที่ 25 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของการดูดซึมน้ำกับรากที่สองของวินาที

3.4.6 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง

การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Permeability Test, RCPT) เมื่อตัวอย่างบ่มครบอายุ 28 วัน นำตัวอย่างทรงกระบอกขนาด $\varnothing 100 \times 200$ mm ตัดขนาดให้ได้ขนาด $\varnothing 100$ ความสูง 50 ± 3 mm โดยการตัดทำการวัดจากส่วนกึ่งกลางของตัวอย่างทรงกระบอก นำตัวอย่างที่ตัดเคลือบผิวด้านข้างด้วยอีพอกซี ใส่ตัวอย่างในเครื่อง Vacuum Desiccator ทำให้สูญญากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เติมน้ำกลั่นในเครื่อง Vacuum Desiccator ให้ท่วมตัวอย่างแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาประกอบใน cell โดยเติม NaCl (3%) ที่ขั้วลบ และเติม NaOH (0.3%) ที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ โดยใช้ไฟฟ้า 60 ± 0.1 V บันทึกค่าทุก 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำมาคำนวณเป็นค่าการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง จากสมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7 แล้วแต่กรณี โดยความสามารถการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในตารางที่ 8 และการทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่งดังแสดงใน

กรณีที่ 1) เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างได้มาตรฐาน

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3.6)$$

เมื่อ Q = ค่าประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่าง คูลอมป์ (coulombs)

I_0 = กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น (A)

I_t = กระแสไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ (A)

กรณีที่ 2) เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างไม่ได้มาตรฐานน้อยกว่า 95 mm

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x} \right)^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ Q_s = ค่าที่ปรับสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้มาตรฐาน (coulombs)

Q_x = ค่าที่ประจุไฟฟ้าผ่านตัวอย่างไม่ได้มาตรฐาน (coulombs)

x = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ไม่ได้มาตรฐาน (mm)



รูปที่ 26 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง

ตารางที่ 8 การต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่งตามมาตรฐาน ASTM C1202

ประจุรวม (coulombs)	ความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง
> 4,000	สูง
2,000-4,000	ปานกลาง
1,000-2,000	ต่ำ
100-1,000	ต่ำมาก
< 100	แทบไม่ซึมผ่าน

3.4.7 คาร์บอนฟุตพริ้นท์

การประเมินปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 3.8 [19] และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ของวัสดุในสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 9 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหนึ่งหน่วยกำลังรับแรงอัดจากสมการ 3.9

$$\text{GHG Emission} = \text{Activity Data} \times \text{Emission Factor} \quad (3.8)$$

เมื่อ $\text{GHG Emission} = \text{ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kg CO}_2\text{e/m}^3\text{)}$

$\text{Activity Data} = \text{วัสดุในสัดส่วนผสม (kg/m}^3\text{)}$

$\text{Emission Factor} = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือน (kg CO}_2\text{e/kg)}$

$$\text{Normalized GHG Emission} = \frac{\text{Total GHG Emission}}{\text{Compressive Strength}} \quad (3.9)$$

เมื่อ $\text{Normalized GHG Emission} =$ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหนึ่งหน่วยกำลังรับแรงอัด ($\text{kg CO}_2\text{e/m}^3/\text{MPa}$)

$\text{Total GHG Emission} =$ ผลรวมของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสัดส่วนผสม ($\text{kg CO}_2\text{e/m}^3$)

$\text{Compressive Strength} =$ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (MPa) ของสัดส่วนผสม

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุในสัดส่วนผสม

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($\text{kg CO}_2/\text{kg}$)	อ้างอิง
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	0.9440	[19]
ซิลิกาฟูมไม่ควบแน่น	0.3540	[28]
เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F	0.0196	[29]
ทรายแบบไม่คัดขนาด	0.0037	[19]
หินระบุ 3/8 in	0.0357	[19]
เส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว	1.4965	[30]
เส้นใยเหล็กแบบคละขนาด	1.4965	[30]
น้ำ	0.0005	[31]
สารลดน้ำพิเศษ	0.7670	[28]

3.4.8 การประเมินราคา

การประเมินราคาสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 3.10 และค่าสัมประสิทธิ์ราคาของวัสดุในสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 10 รวมถึงวัสดุในราคาท้องตลาด (MST, SST, W, SP)

$$\text{Cost} = \text{Activity Data} \times \text{Cost Factor} \quad (3.10)$$

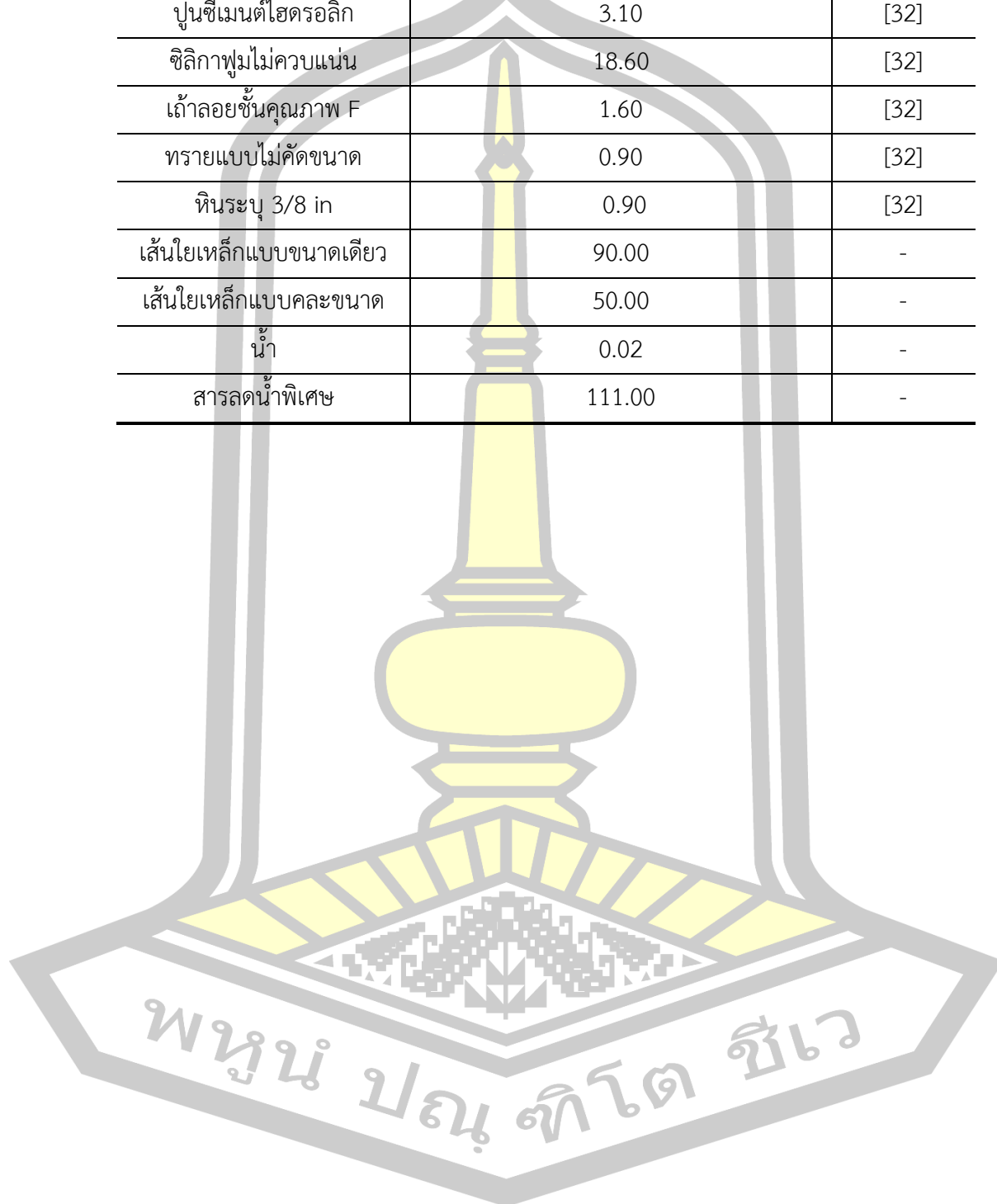
เมื่อ $\text{Cost} =$ ราคาของสัดส่วนผสม (THB/ m^3)

$\text{Activity Data} =$ วัสดุในสัดส่วนผสม (kg/m^3)

$\text{Emission Cost} =$ ค่าสัมประสิทธิ์ราคา (THB/kg)

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์ราคาของวัสดุในสัดส่วนผสม

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์ราคา (THB/kg)	อ้างอิง
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	3.10	[32]
ซีลีกาฟุ่มไม่ควบแน่น	18.60	[32]
เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F	1.60	[32]
ทรายแบบไม่คัดขนาด	0.90	[32]
หินระบุ 3/8 in	0.90	[32]
เส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียว	90.00	-
เส้นใยเหล็กแบบคละขนาด	50.00	-
น้ำ	0.02	-
สารลดน้ำพิเศษ	111.00	-

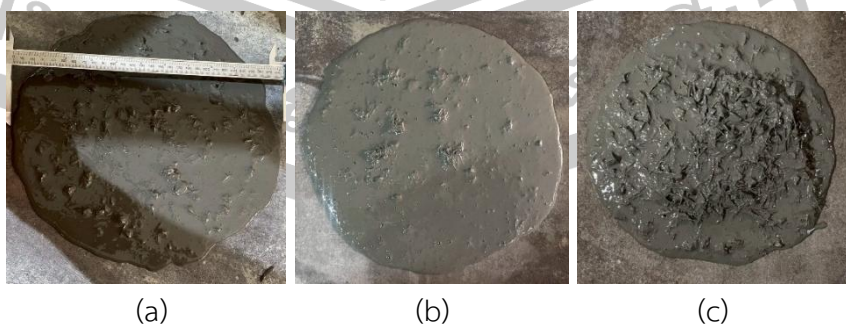


บทที่ 4

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่ 20% (FA20MST2), 40% (FA40MST2) และ 60% (FA60MST2) เทียบกับสัดส่วนผสมอ้างอิง (Ref.SST2) การทดสอบคุณสมบัติได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คือ การไหลแผ่ คุณสมบัติเชิงกล คือ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน คุณสมบัติความทนทาน คือ อัตราการดูดซึมน้ำ และการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้ยังมีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์รวมถึงราคาของวัสดุผสมแต่ละชนิดในแต่ละสัดส่วนผสม โดยส่วนผสม Ref.SST2 มีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0% เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียวปริมาณ 2% โดยปริมาตร และส่วนผสม FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 มีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ 20%, 40% และ 60% ตามลำดับ เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบขนาดขนาดปริมาณ 2% โดยปริมาตร ผลจากการทดสอบการไหลแผ่ของทุกสัดส่วนผสมอยู่ในช่วง 200-250 mm เพื่อให้เพียงพอต่อความสามารถในการทำงาน ดังแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ 13

นอกจากนี้กล่าวถึงการทดสอบผลกระทบปริมาณเส้นใยเหล็ก โดยเลือกใช้สัดส่วนผสม FA40MST2 ใช้ในการศึกษาเสริมด้วยเส้นใยเหล็กปริมาณต่างกัน คือ 0.5% (FA40MST0.5), 1% (FA40MST1) และ 2% (FA40MST2) การทดสอบคุณสมบัติ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คือ การไหลแผ่ คุณสมบัติเชิงกล คือ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 3 และ 28 วัน กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดัด ที่อายุ 28 วัน ผลจากการทดสอบการไหลแผ่ของทุกสัดส่วนผสมมีค่าไม่น้อยกว่า 200 mm โดยค่าการไหลแผ่ของปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.5% (FA40MST0.5), 1% (FA40MST1) และ 2% (FA40MST2) มีค่าเท่ากับ 281.19, 287.94 และ 225.28 mm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อลดปริมาณเส้นใยเหล็กค่าการไหลแผ่ และการกระจายตัวของ RPC มีแนวโน้มดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 27

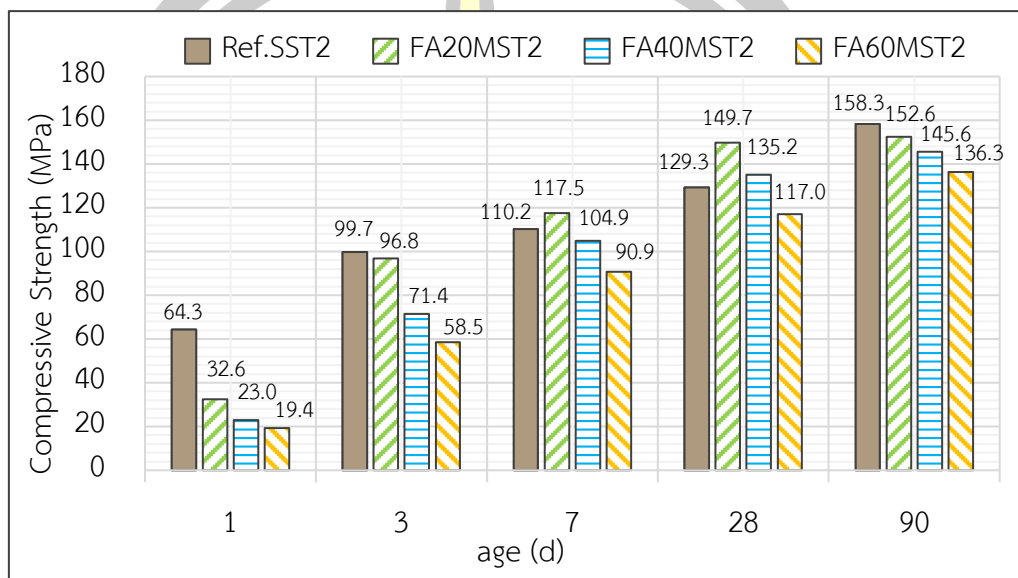


รูปที่ 27 การไหลแผ่ของสัดส่วนผสมโดยที่ (a) FA40MST0.5, (b) FA40MST1 และ (c) FA40MST2

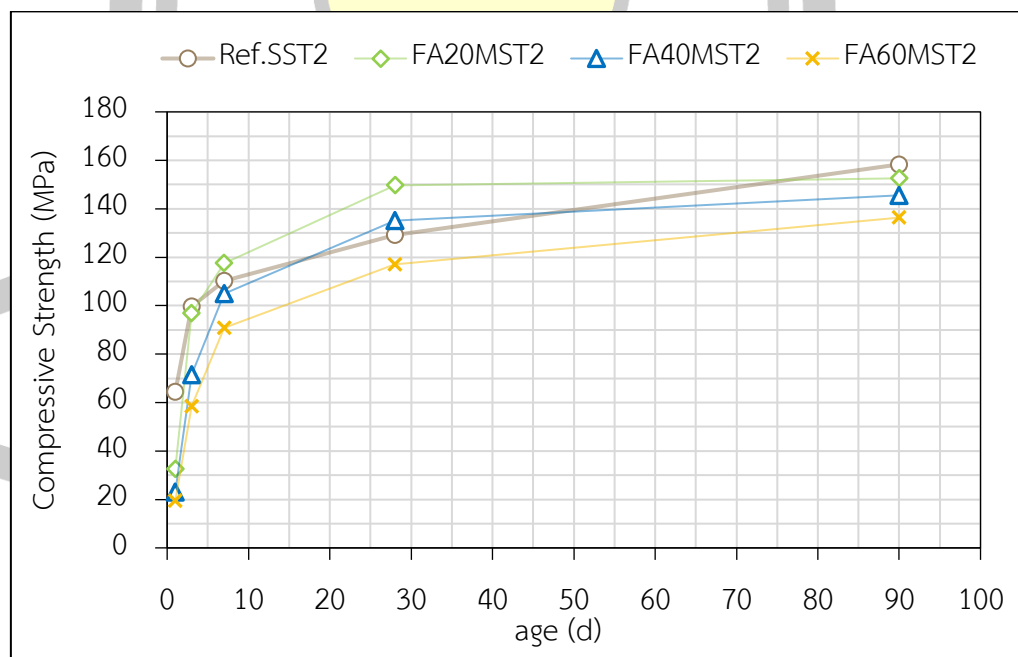
4.1 การพัฒนากำลังรับแรงอัด

4.1.1 ผลกระทบเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด

รูปที่ 28 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับสัดส่วนผสม Ref.SST2, FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 ทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน



รูปที่ 28 กำลังรับแรงอัดของ RCP ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%



รูปที่ 29 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของ RCP ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน

และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 28 พบว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของ RPC ในช่วงอายุต้นที่ 1 วัน ของสัดส่วนผสม FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 เท่ากับ 32.6, 23.0 และ 19.4 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบสัดส่วนผสม Ref.SST2 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 64.3 MPa ยังพบแนวโน้มนี้ที่อายุ 3 วัน โดยสัดส่วนผสม FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 96.7, 71.4 และ 58.5 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 99.7 MPa อย่างไรก็ตามสัดส่วนผสม FA20MST2 มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับสัดส่วนผสม Ref.SST2 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอายุต้น (ไม่เกิน 3 วัน) การทดสอบที่อายุ 7 วัน สัดส่วนผสม FA20MST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 117.5 MPa ขณะที่สัดส่วนผสม Ref.SST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 110.2 MPa ซึ่งสัดส่วนผสม FA40MST2 และ FA60MST2 ยังคงมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่า Ref.SST2 โดยค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 104.9 และ 90.9 MPa ตามลำดับ

การทดสอบที่อายุ 28 วัน สัดส่วนผสม FA20MST2 และ FA40MST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 149.7 และ 135.2 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 129.3 MPa ขณะที่สัดส่วนผสม FA60MST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 117.0 MPa ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าสัดส่วนผสม Ref.SST2 เมื่อระยะเวลาการทดสอบยาวนานขึ้นที่อายุ 90 วัน กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มคล้ายกับช่วงอายุต้น (ไม่เกิน 3 วัน) โดยสัดส่วนผสม FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 152.6, 145.6 และ 136.3 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 158.3 MPa ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอีกภายหลังจากปูนซีเมนต์ และซิลิกาฟุ่มปริมาณสูงของสัดส่วนผสม Ref.SST2 อย่างไรก็ตามทุกสัดส่วนผสมมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุดังแสดงในรูปที่ 29 และหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยของสัดส่วนผสมในทุกอายุการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 11 โดยผลการทดสอบคล้ายกับ Yigiter et al. [7] ที่พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณ 20% ที่อายุ 7 และ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของ RPC มีค่ามากกว่าส่วนผสมควบคุม ซึ่งปริมาณเถ้าลอยที่ 40% กำลังรับแรงอัดมีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุม ขณะที่ปริมาณเถ้าลอยที่ 60% มีค่าน้อยกว่าส่วนผสมควบคุม แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการทดสอบเป็น 90 วัน ทุกสัดส่วนผสมที่มีเถ้าลอยให้ค่าน้อยกว่าส่วนผสมควบคุม นอกจากนี้ Monosi et al. [33] ได้ศึกษาผลของขนาดมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของ RPC โดยเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมที่ใช้มวลรวมละเอียด (0.1-0.4 mm) และส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบ (0.1-8.0 mm) พบว่า RPC ทั้งสองส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดของมวลรวมในส่วนผสมอาจไม่เป็นปัจจัยหลักต่อกำลังรับแรงอัดของ RPC

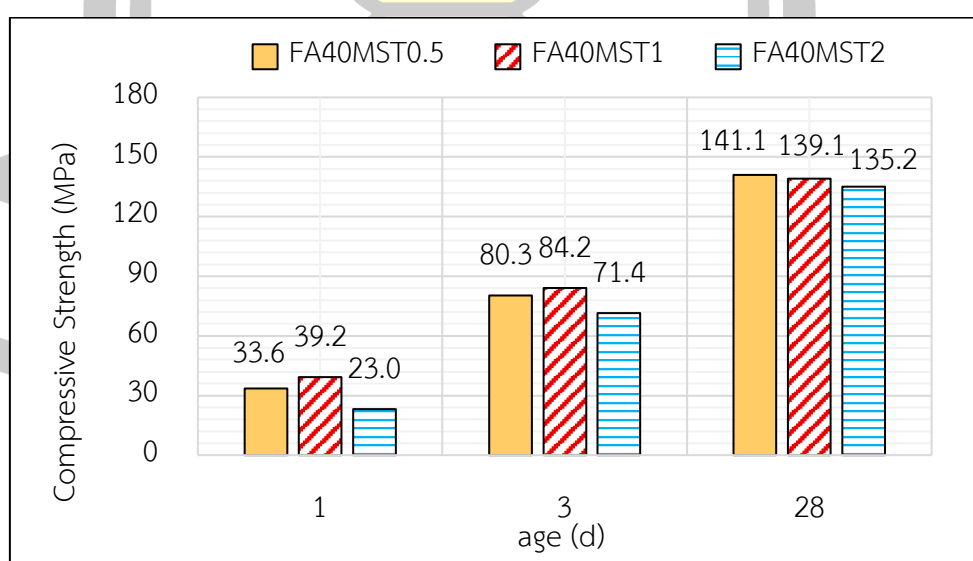
ตารางที่ 11 หน่วยน้ำหนักของสัดส่วนผสมผลกระทบของเถ้าลอย (kg/m^3)

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)				
	1	3	7	28	90
Ref.SST2	2,315	2,376	2,370	2,359	2,414
FA20MST2	2,401	2,418	2,422	2,447	2,436
FA40MST2	2,267	2,373	2,392	2,397	2,366
FA60MST2	2,301	2,300	2,302	2,304	2,306

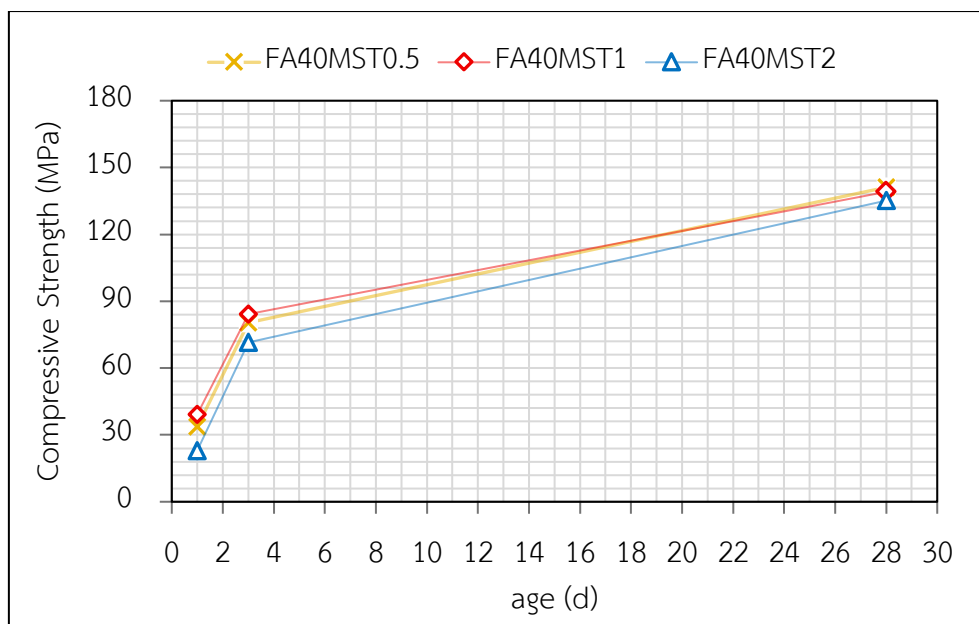
ในสัดส่วนผสมที่มีเถ้าลอยการลดลงของกำลังรับแรงอัดเกิดจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ซึ่งเป็นวัสดุหลักในปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สร้างเจล Calcium Silicate Hydrate gel (C-S-H gel) ที่มีส่วนสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดของ RPC ที่มีเถ้าลอยในสัดส่วนผสมมีแนวโน้มดีขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอีกภายหลังจากปูนซีเมนต์อาจไม่ได้ทำปฏิกิริยาในช่วงต้นส่งผลให้เกิดเจลเพิ่มขึ้นช่วยเสริมความแข็งแรงของ RPC [34]

4.1.2 ผลกระทบเส้นใยเหล็กต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด

รูปที่ 30 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับสัดส่วนผสม FA40MST0.5, FA40MST1 และ FA40MST2 ทดสอบที่อายุ 1, 3 และ 28 วัน



รูปที่ 30 กำลังรับแรงอัดของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดปริมาณต่างกัน



รูปที่ 31 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดปริมาณต่างกัน

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 30 พบว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของ RPC ในช่วงอายุต้นที่ 1 วัน ของสัดส่วนผสม FA40MST0.5, FA40MST1 และ FA40MST2 เท่ากับ 33.6, 39.2 และ 23.0 MPa ตามลำดับ โดยสัดส่วนผสม FA40MST1 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมา คือ สัดส่วนผสม FA40MST0.5 ขณะที่ FA40MST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุด แนวโน้มนี้ยังพบในช่วงอายุที่ 3 วัน ซึ่งสัดส่วนผสม FA40MST0.5, FA40MST1 และ FA40MST2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 80.3, 84.2 และ 71.4 MPa ตามลำดับ โดยสัดส่วนผสม FA40MST1 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมา คือ สัดส่วนผสม FA40MST0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าแต่มีค่าใกล้เคียงกับสัดส่วนผสม FA40MST1 ขณะที่สัดส่วนผสม FA40MST2 ยังคงมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุด

การทดสอบที่ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของสัดส่วนผสม FA40MST0.5, FA40MST1 และ FA40MST2 เท่ากับ 141.1, 139.1 และ 135.2 MPa ตามลำดับ โดยสัดส่วนผสม FA40MST0.5 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมา คือ สัดส่วนผสม FA40MST1 และ FA40MST2 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุด แสดงให้เห็นว่าการลดปริมาณเส้นใยเหล็กไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดเมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นการพัฒนากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 31 และหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยของสัดส่วนผสมในทุกอายุการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 12

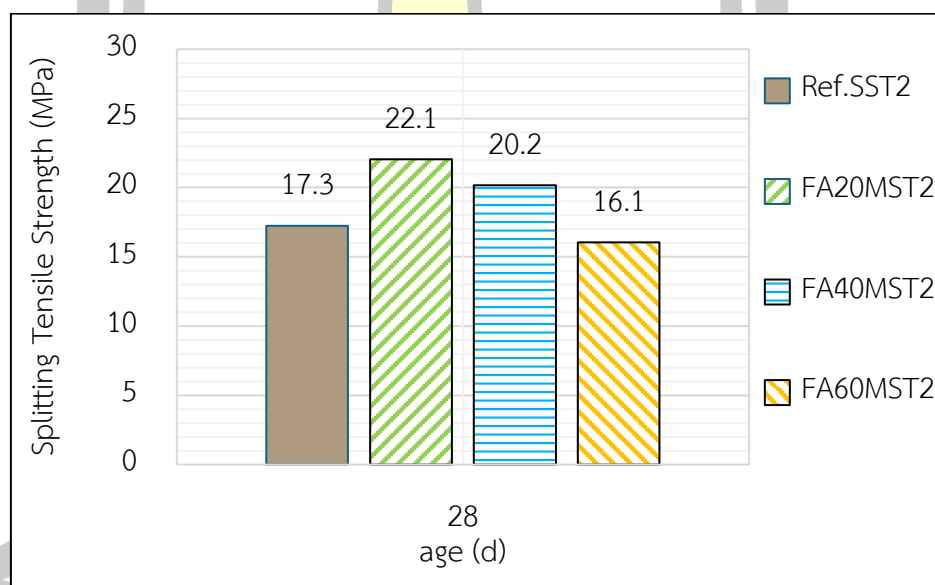
ตารางที่ 12 หน่วยน้ำหนักของสัดส่วนผสมผลกระทบบเส้นใยเหล็ก (kg/m^3)

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)		
	1	3	28
FA40MST0.5	2,277	2,282	2,296
FA40MST1	2,265	2,312	2,356
FA40MST2	2,267	2,373	2,397

4.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

4.2.1 ผลกระทบบเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

รูปที่ 32 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก สำหรับสัดส่วนผสม Ref.SST2, FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 ทดสอบที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 32 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 32 พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเฉลี่ยของ RPC โดยสัดส่วนผสม FA20MST2 และ FA40MST2 เท่ากับ 22.1 และ 20.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังรับดึงแบบผ่าซีกมากกว่าสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีค่าเท่ากับ 17.3 MPa แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสมที่มีเถ้าลอยอัตราส่วน 20% และ 40% เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดปริมาณ 2% ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18-0.35 mm ความยาว 12-14 mm ส่งผลดีต่อ RPC [35] ขณะที่สัดสัดส่วน

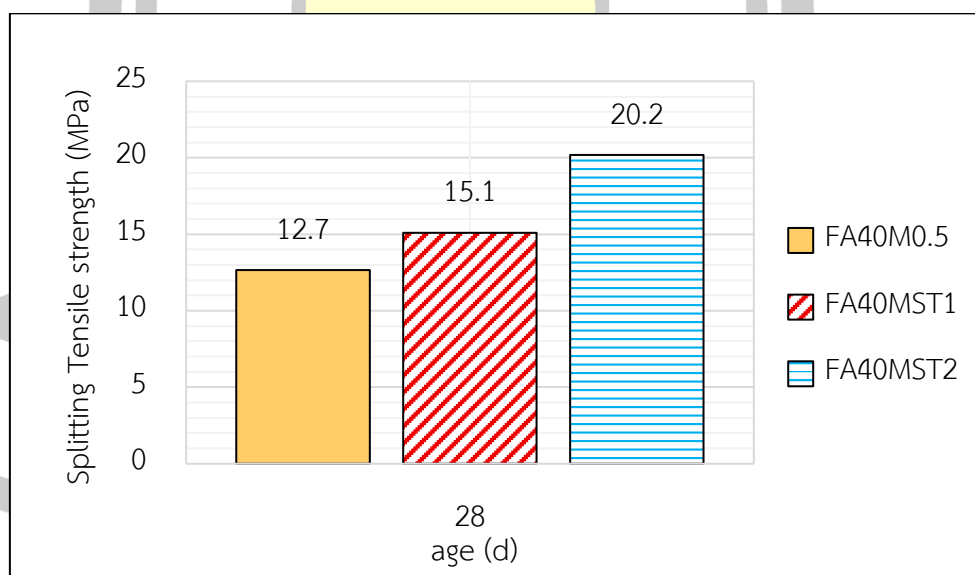
ผสม FA60MST2 มีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเท่ากับ 16.3 MPa ซึ่งน้อยกว่าสัดส่วนผสม Ref.SST2 แต่ยังมีค่ากำลังรับดึงแบบผ่าซีกใกล้เคียงกับสัดส่วนผสม Ref.SST2 ทั้งนี้ทุกสัดส่วนผสมมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกันซึ่งเกิดรอยแตกแนวในตั้งตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และขยายตัวออกไปยังผิวด้านนอกตามแนวเดียวกัน โดยตัวอย่างทั้งหมดไม่เกิดการแยกออกเป็นสองส่วนเนื่องจากมีเส้นใยเหล็กในสัดส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 33



รูปที่ 33 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน

4.2.2 ผลกระทบเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

รูปที่ 34 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก สำหรับสัดส่วนผสม FA40MST0.5, FA40MST1 และ FA40MST2 ทดสอบที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 34 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบละขนาดปริมาณต่างกัน

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 34 พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเฉลี่ยของ RPC สัดส่วนผสม FA40MST0.5 และ FA40MST1 เท่ากับ 12.7 และ 15.1 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่มีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเท่ากับ 20.2 MPa โดยสัดส่วนผสม FA40MST0.5 มีค่าลดลงอย่างชัดเจนประมาณ 37% เมื่อเทียบกับสัดส่วนผสม FA40MST2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเส้นใยเหล็กมีส่วนสำคัญต่อกำลังรับแรงดึง เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยให้ RPC มีความยืดหยุ่นรวมถึงความต้านทานต่อความเปราะสูงขึ้น ซึ่งลักษณะการวิบัติของทุกสัดส่วนผสมที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกัน เกิดรอยแตกแนวในตั้งตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และขยายตัวออกไปยังผิวด้านนอกตามแนวเดียวกัน โดยตัวอย่างทั้งหมดไม่เกิดการแยกออกเป็นสองส่วนเนื่องจากมีเส้นใยเหล็กในสัดส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 35



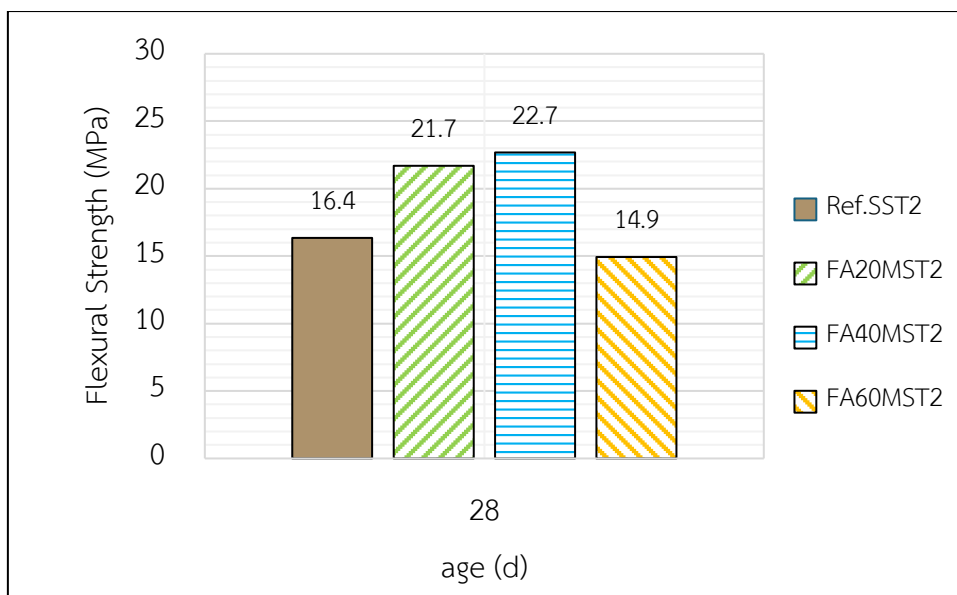
รูปที่ 35 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกัน

4.3 กำลังรับแรงดัด

4.3.1 ผลกระทบเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงดัด

รูปที่ 36 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด สำหรับสัดส่วนผสม Ref.SST2, FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 โดยทดสอบที่อายุ 28 วัน

พหุ ประจักษ์ ชีวะ



รูปที่ 36 กำลังรับแรงดัดของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%

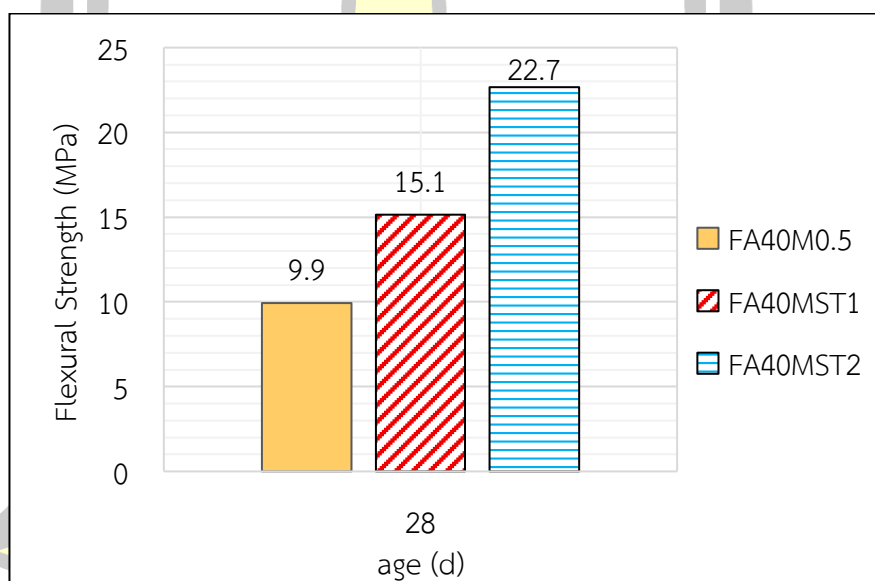
จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 36 พบว่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยของ RPC ที่อายุ 28 วัน ของสัดส่วนผสม FA20MST2 และ FA40MST2 เท่ากับ 21.7 และ 22.7 MPa ซึ่งมากกว่าสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 16.4 MPa ขณะที่สัดส่วนผสม FA60MST2 มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 14.9 MPa มีค่าน้อยกว่าส่วนผสม Ref.SST2 แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ RPC ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกช่วยเติมเต็มช่องว่างเพิ่มความหนาแน่นของ RPC [29] นอกจากนี้การเพิ่มความของเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด [35] สำหรับลักษณะการวิบัติของ RPC ในทุกสัดส่วนผสมที่มีเถ้าลอยเกิดรอยแตกกว้างทั้งในบริเวณช่วงกลาง และนอกช่วงกลางของ RPC ขณะที่สัดส่วนผสม Ref.SST2 เกิดรอยแตกกว้างในบริเวณช่วงกลางของ RPC นอกจากนี้ขนาดของรอยแตกกว้างของสัดส่วนผสมที่มีเถ้าลอยในปริมาณ 20% และ 40% มีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งมีขนาดของรอยแตกกว้างเล็กกว่าสัดส่วนผสมที่มีเถ้าลอยในปริมาณ 60% และ Ref.SST2 แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการขยายตัวของรอยแตกได้รวมถึงการมีเส้นใยเหล็กในสัดส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 37



รูปที่ 37 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน

4.3.2 ผลกระทบเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงดัด

รูปที่ 38 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด สำหรับสัดส่วนผสม FA40MST0.5, FA40MST1 และ FA40MST2 ทดสอบที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 38 กำลังรับแรงดัดของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอย 40% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดปริมาณต่างกัน

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 38 พบว่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยของ RPC ที่อายุ 28 วัน ของสัดส่วนผสม FA40MST0.5 และ FA40MST1 เท่ากับ 9.9 และ 15.1 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 22.7 MPa โดยสัดส่วนผสม FA40MST0.5 และ FA40MST1 มีค่ากำลังรับแรงดัดลดลงประมาณ 56% และ 34% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสัดส่วนผสม FA40MST2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กส่งผลดีต่อ

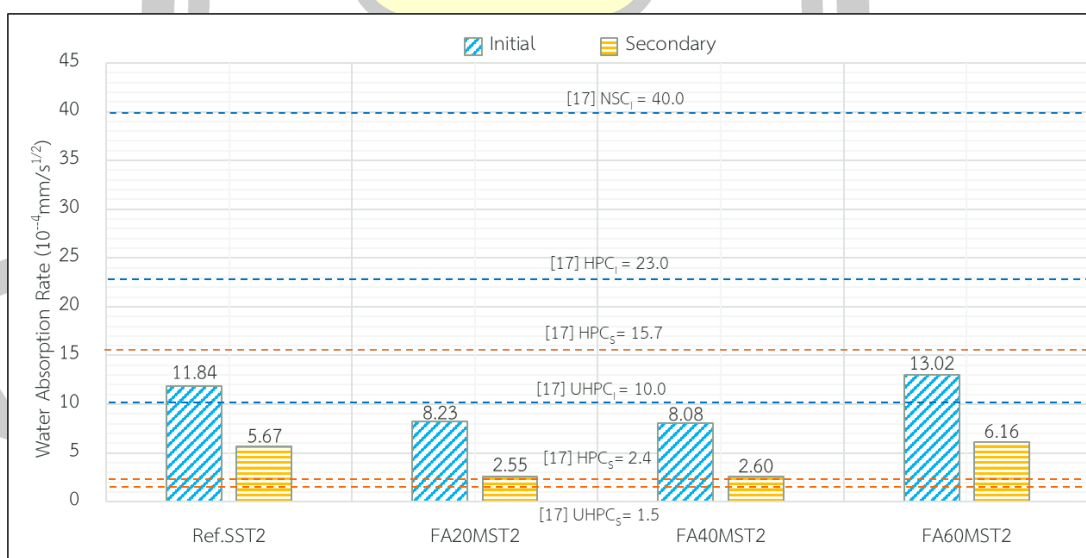
ความสามารถในการกำลังรับแรงดัด เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยต้านทานรอยร้าวขนาดเล็กพร้อมทั้งเพิ่มความเหนียวให้กับ RPC สำหรับลักษณะการวิบัติของ RPC ในทุกสัดส่วนผสม พบว่าเกิดรอยแตกร้าวทั้งในบริเวณช่วงกลาง และนอกช่วงกลางของตัวอย่าง โดยสังเกตได้ว่าขนาดของรอยแตกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยแตกร้าว และเพิ่มความเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 39



รูปที่ 39 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกัน

4.4 อัตราการดูดซึมน้ำ

รูปที่ 40 แสดงผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ สำหรับสัดส่วนผสม Ref.SST2, FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 ทดสอบที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 40 อัตราการดูดซึมน้ำของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 40 พบว่าในทุกสัดส่วนผสมมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันสำหรับในช่วง Initial (1 นาที-6 ชั่วโมง) มีค่าอยู่ช่วง $11.84\text{--}13.02 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ และช่วง Secondary (1-7 วัน) มีค่าอยู่ช่วง $5.67\text{--}6.16 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ โดยค่าอัตราการดูดซึมน้ำในช่วง Initial มีค่าสูงกว่าช่วง Secondary ไม่น้อยกว่า 47% ดังนั้นระยะเวลาทดสอบที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงซึ่งเป็นผลดี

เมื่อพิจารณาค่าอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยในช่วง Initial พบว่าสัดส่วนผสม FA20MST2 และ FA40MST2 มีค่าเท่ากับ 8.23×10^{-4} และ $8.08 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสม Ref.SST2 มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ $11.84 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ ขณะที่สัดส่วนผสม F60MST2 มีค่าอัตราการดูดซึมสูงสุดเท่ากับ $13.02 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ แนวโน้มนี้ยังพบในอัตราการดูดซึมน้ำในช่วง Secondary โดยสัดส่วนผสม FA20MST2 และ FA40MST2 มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.55×10^{-4} และ $2.60 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสม Ref.SST2 มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ $5.67 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ โดยที่สัดส่วนผสม FA60MST2 มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดเท่ากับ $6.16 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$

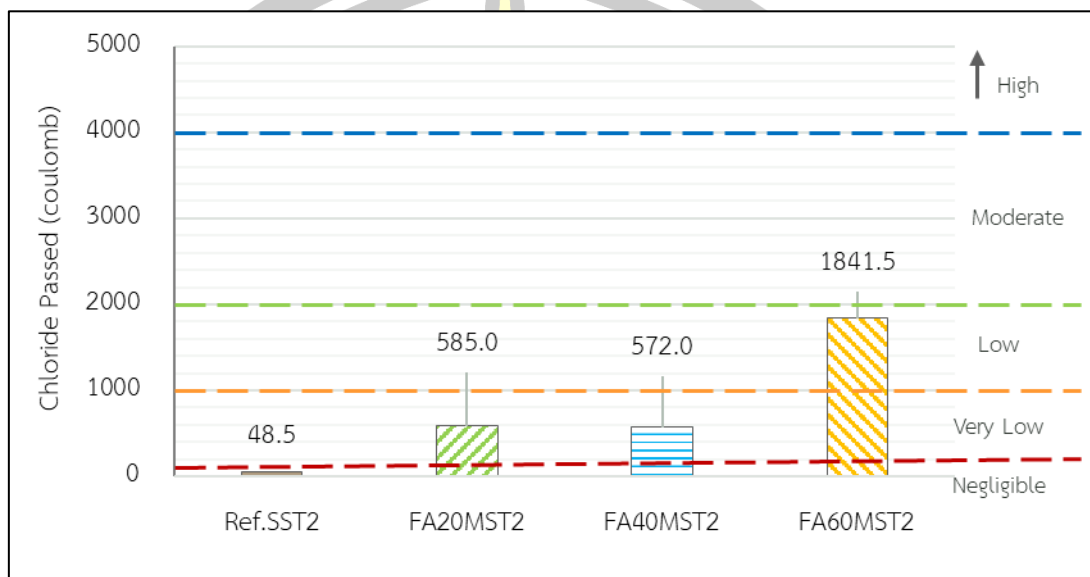
แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยในสัดส่วนผสมปริมาณ 20% และ 40% แทนที่ปูนซีเมนต์ส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนสัดส่วน Ref.SST2 เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยช่วยทำให้เกิดการเติมเต็มในช่องว่างส่งผลให้โครงสร้างภายในของ RPC มีความหนาแน่นมากขึ้น [8] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเถ้าลอยในสัดส่วนผสมปริมาณ 60% พบว่า RPC อาจเกิดช่องว่างภายในมากขึ้นรวมถึงการอมน้ำจากปริมาณเถ้าลอยที่มากเกินไปในสัดส่วนผสมซึ่งส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Sohail et.al [17] พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำในช่วง Initial ของทุกสัดส่วนผสมจะมีค่าใกล้เคียงกับ UHPC และการดูดซึมน้ำในช่วง Secondary สัดส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 20% และ 40% ใกล้เคียงช่วงอยู่ UHPC และ HPC สำหรับอัตราการดูดซึมน้ำของสัดส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60% และสัดส่วนผสม Ref.SST2 มีค่าใกล้เคียงกับ HPC

พูน ปณ จิต ชเว

4.5 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง

รูปที่ 41 แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง สำหรับสัดส่วนผสม Ref.SST2, FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 ทดสอบที่อายุ 28 วัน



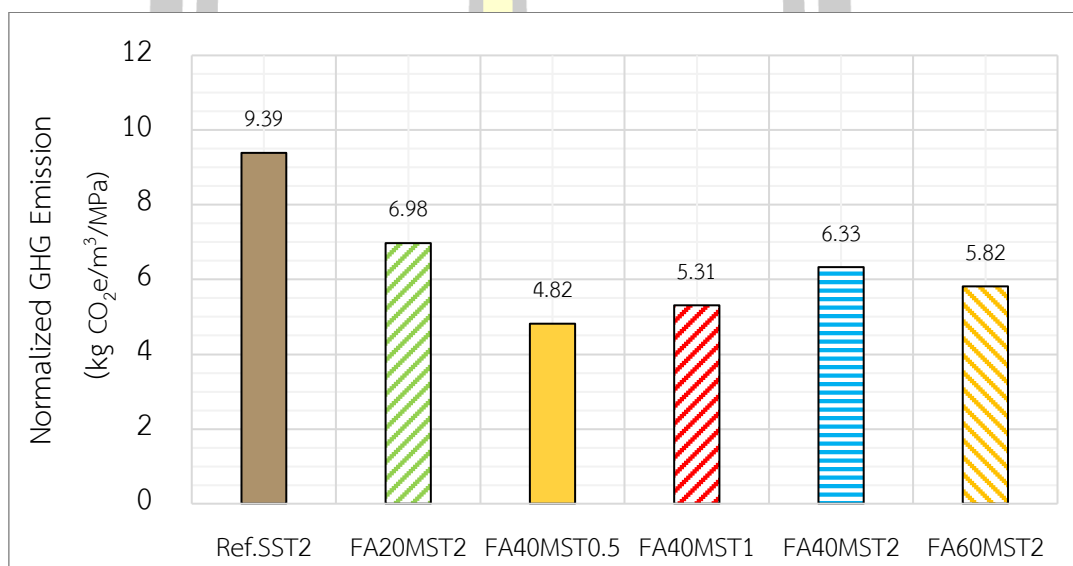
รูปที่ 41 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งของของ RPC ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่างกัน และเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณ 2%

รูปที่ 41 พบว่าสัดส่วนผสม FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 มีค่าการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งเท่ากับ 585.0, 572.0 และ 1,841.5 coulomb ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีค่าการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งเท่ากับ 48.5 coulomb เมื่อเทียบกับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งกับดังแสดงในตารางที่ 8 สัดส่วนผสม FA20MST2 และ FA40MST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งอยู่ในช่วงต่ำมาก สัดส่วนผสม Ref.SST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งน้อยสุดอยู่ในช่วงต่ำมากแทบไม่ซึมผ่าน แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 20% และ 40% เหมาะสมกับงานที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อน ขณะที่สัดส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60% ให้ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งสูงสุดซึ่งอยู่ในช่วงต่ำ อาจเกิดจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ รวมถึงการเกิดสนิมของเส้นใยเหล็กส่งผลกระทบต่อค่าการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่ง โดยทุกสัดส่วนผสมที่มีเถ้าลอยเกิดสนิมที่เส้นใยเหล็กอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่สัดส่วนผสม Ref.SST2 มีสนิมเพียงเล็กน้อยจึงทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งมีค่าต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 42



รูปที่ 42 ตัวอย่างหลังการทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์แบบเร่ง

4.6 คาร์บอนฟุตพริ้นท์

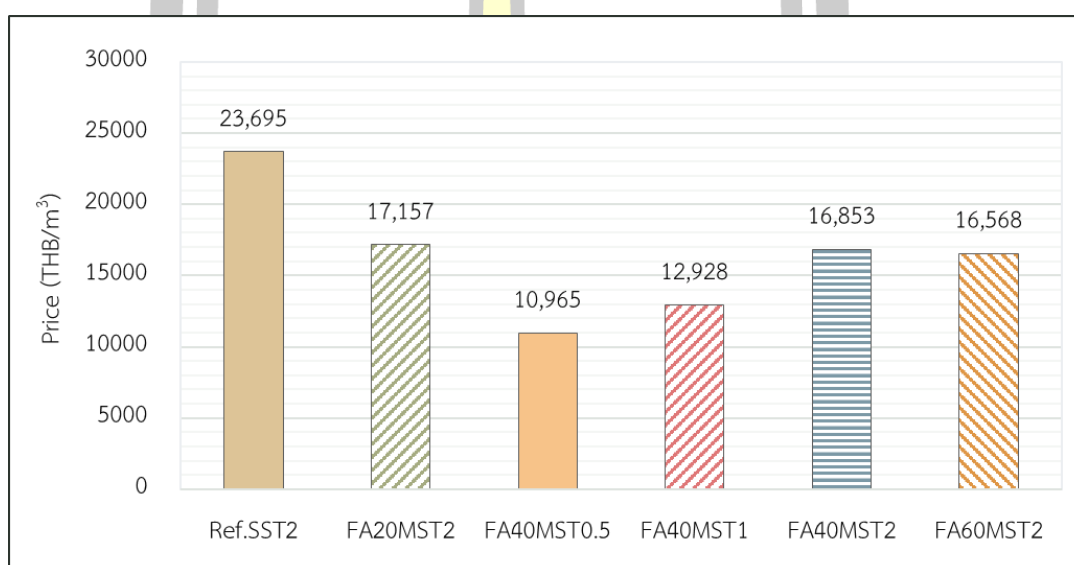


รูปที่ 43 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของ RPC ของทุกสัดส่วนผสม

จากผลการประเมินดังแสดงในรูปที่ 43 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหนึ่งหน่วยกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (Normalized GHG Emission) ของ RPC พบว่าสัดส่วนผสม FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 มีค่าเท่ากับ 6.98, 6.33 และ 5.82 kg CO₂e/m³/MPa ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีค่า 9.39 kg CO₂e/m³/MPa โดยการใช้เถ้าลอยในสัดส่วนผสมปริมาณ 20%, 40% และ 60% สามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 26%, 33% และ 38% ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าลอยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.0196 kg CO₂/kg ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 0.9440 kg CO₂/kg ดังแสดงในตารางที่ 9 นอกจากนี้ถ้า RPC มีอัตราส่วน W/C ต่ำส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์สูง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในสัดส่วนผสมส่งผลให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ RPC ลดลง [36]

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่ลดลง สัดส่วนผสม FA40MST0.5 และ FA40MST1 มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 4.82 และ 5.31 kg CO₂e/m³/MPa ตามลำดับ โดยสัดส่วนผสม FA40MST0.5 มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด ซึ่งลดลงจากส่วนผสม Ref.SST2 ประมาณ 49% ขณะที่สัดส่วนผสม FA40MST1 ลดลงประมาณ 44% จากส่วนผสม Ref.SST2

4.7 การประเมินราคา

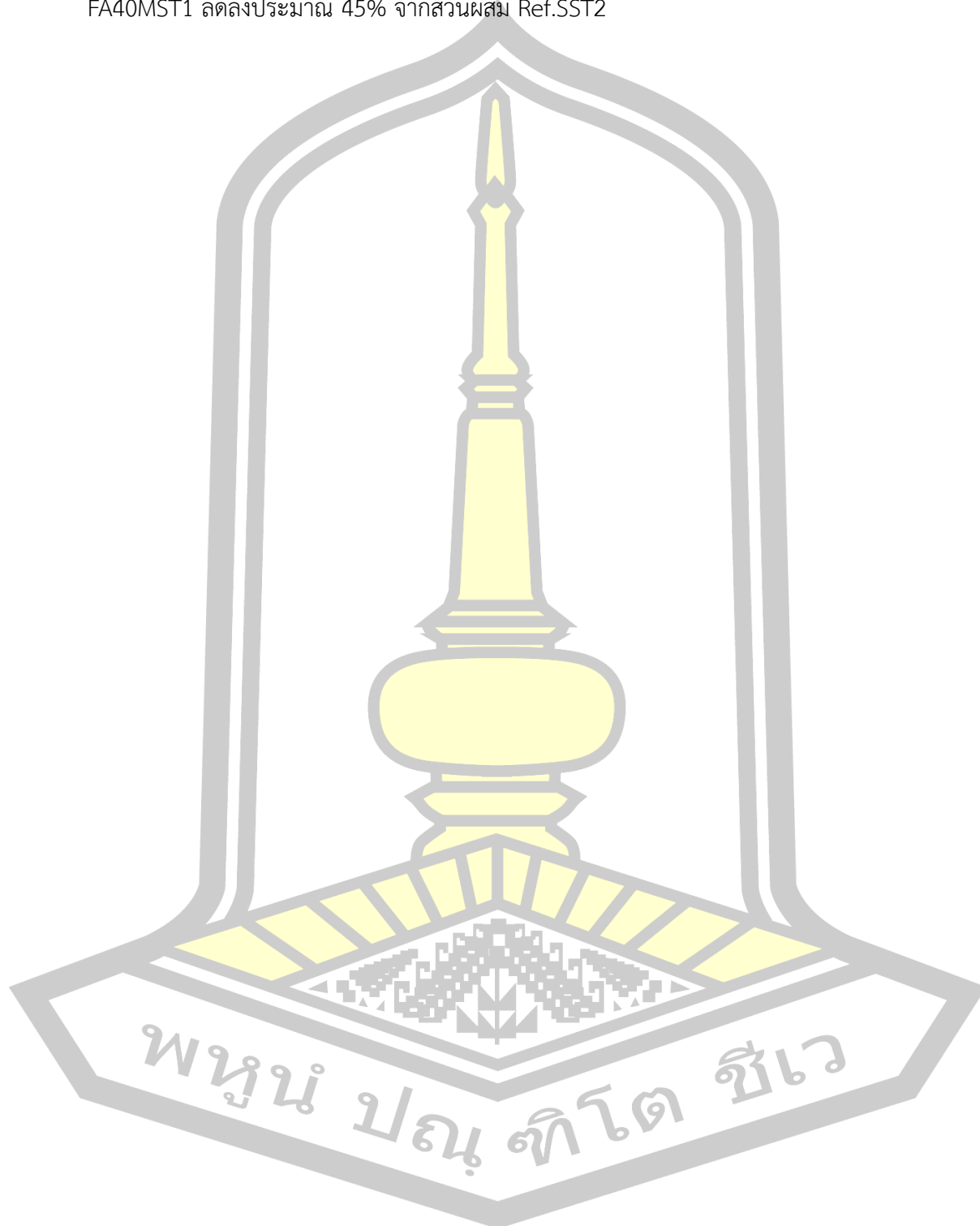


รูปที่ 44 การประเมินราคาของทุกสัดส่วนผสม

จากผลการประเมินดังแสดงในรูปที่ 44 ของ RPC พบว่าสัดส่วนผสม FA20MST2, FA40MST2 และ FA60MST2 มีราคาเท่ากับ 17,147, 16,853 และ 16,568 THB/m³ ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากส่วนผสม Ref.SST2 ที่มีราคาเท่ากับ 23,695 THB/m³ โดยการใช้เถ้าลอยในสัดส่วนผสมปริมาณ 20%, 40% และ 60% เสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดสามารถลดราคาได้ประมาณ 28%, 29% และ 30% ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าลอยมีราคา 1.6 THB/kg ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่มีราคา 3.1 THB/kg รวมถึงเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดที่มีราคา 50 THB/kg ซึ่งลดลงจากเส้นใยเหล็กแบบขนาดเดียวที่ราคา 90 THB/kg ประมาณ 40% ดังแสดงในตารางที่ 10

นอกจากนี้ราคามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่ลดลง โดยสัดส่วนผสม FA40MST0.5 และ FA40MST1 มีราคาเท่ากับ 10,965 และ 12,968 THB/kg ซึ่งสัดส่วนผสม

FA40MST0.5 มีราคาต่ำสุดซึ่งลดลงจากส่วนผสม Ref.SST2 ประมาณ 54% ขณะที่สัดส่วนผสม
FA40MST1 ลดลงประมาณ 45% จากส่วนผสม Ref.SST2



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ความทนทาน และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของรีแอ็คทีฟพาวเดอร์คอนกรีต (RPC) ที่ใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F แทนที่ ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 20%, 40% และ 60% และเสริมด้วยเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดในปริมาณ 2% นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติเชิงกล จากผลกระทบของเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดปริมาณ 0.5%, 1%, 2% โดยปริมาตร โดยมีผลการศึกษาดังนี้

1. ผลกระทบของเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัด พบว่ากำลังรับแรงอัดของ RPC ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย โดย RPC ที่ใช้เถ้าลอยปริมาณ 20%, 40%, และ 60% และเสริมเส้นใยเหล็กแบบคละขนาดปริมาณ 2% มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 149.7, 135.2 และ 117.0 MPa ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดของทุกสัดส่วนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา

2. ผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงอัด พบว่าปริมาณเส้นใยเหล็ก 1% มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดช่วงอายุต้น โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 33.6 และ 80.3 MPa ที่อายุ 1 และ 3 วัน ตามลำดับ โดยที่อายุ 28 วัน ปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.5% ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 141.12 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับเส้นใยเหล็ก 1% และ 2% ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 139.1 และ 135.1 MPa ตามลำดับ

3. ผลกระทบของเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของ RPC ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย โดย RPC ที่ใช้เถ้าลอยปริมาณ 20%, 40%, และ 60% เสริมเส้นใยเหล็กแบบคละปริมาณ 2% มีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 22.1, 20.2 และ 16.1 MPa ตามลำดับ โดย RPC ที่ใช้เถ้าลอยปริมาณ 20% และ 40% มีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมากกว่า RPC ที่ใช้สัดส่วนผสมอ้างอิง ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเท่ากับ 17.3 MPa

4. ผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของ RPC ลดลงตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่ลดลง โดยค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน ของ RPC ที่มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.5%, 1%, และ 2% MPa เท่ากับ 12.7, 15.1, และ 20.2 MPa ตามลำดับ

5. ผลกระทบของเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงดัด พบว่าปริมาณเถ้าลอย 40% ให้กำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน สูงสุดเท่ากับ 22.7 MPa ขณะที่ปริมาณเถ้าลอย 20% และ 60% ให้กำลังรับแรงดัด

เท่ากับ 21.7 และ 14.9 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณเถ้าลอย 20% ให้กำลังรับแรงดัดประมาณ 93% ของปริมาณเถ้าลอย 40% อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าลอย 20% และ 40% ก็ให้ค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่า RPC ที่ใช้สัดส่วนผสมอ้างอิง (16.3 MPa) ประมาณ 1.32 และ 1.38 เท่า ตามลำดับ

6. ผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงดัด พบว่ากำลังรับแรงดัดของ RPC เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็ก โดย RPC ที่ใช้ปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.5%, 1%, และ 2% มีกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 9.9, 15.1, และ 22.7 MPa ตามลำดับ

7. อัตราการดูดซึมน้ำของ RPC พบว่าทุกสัดส่วนผสมมีอัตราการดูดซึมน้ำในช่วง Initial และในช่วง Secondary มีค่าใกล้เคียงกันให้ค่าอยู่ช่วง $8.08-13.02 \text{ mm/s}^{1/2}$ และ $2.55-6.61 \text{ mm/s}^{1/2}$ ตามลำดับ ซึ่งปริมาณเถ้าลอย 20% และ 40% ให้อัตราการดูดซึมน้ำน้อยกว่าสัดส่วนผสมอ้างอิง ทั้งในช่วง Initial และช่วง Secondary ขณะที่ปริมาณเถ้าลอย 60% ให้อัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดซึ่งมากกว่าสัดส่วนผสมอ้างอิงทั้งในช่วง Initial และช่วง Secondary

8. การซึมผ่านคลอไรด์แบบแรงของ RPC พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยไม่เกิน 40% RPC มีการซึมผ่านของคลอไรด์แบบแรงอยู่ในระดับต่ำมาก แต่ถ้าปริมาณเถ้าลอยเป็น 60% RPC มีการซึมผ่านของคลอไรด์แบบแรงแย่งเป็นระดับต่ำ ขณะที่ RPC อ้างอิงอยู่ในระดับแทบไม่ซึมผ่าน

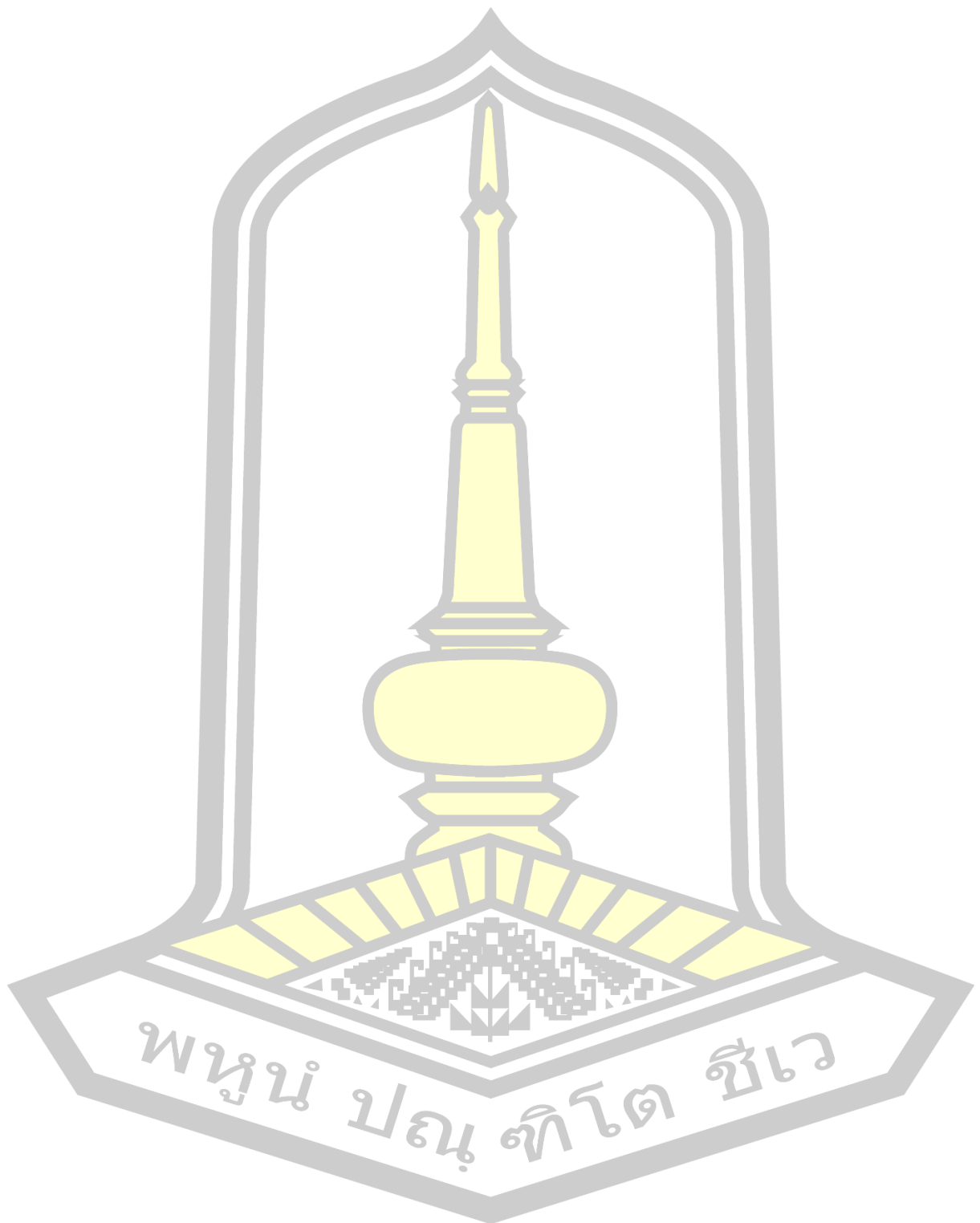
9. คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของ RPC พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหนึ่งหน่วยกำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60%, 40% และ 20% ให้ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 5.82, 6.33 และ 6.98 $\text{kg CO}_2\text{e/m}^3\text{/MPa}$ ตามลำดับ ลดลงประมาณ 38%, 33% และ 26% ตามลำดับ ของสัดส่วนอ้างอิง

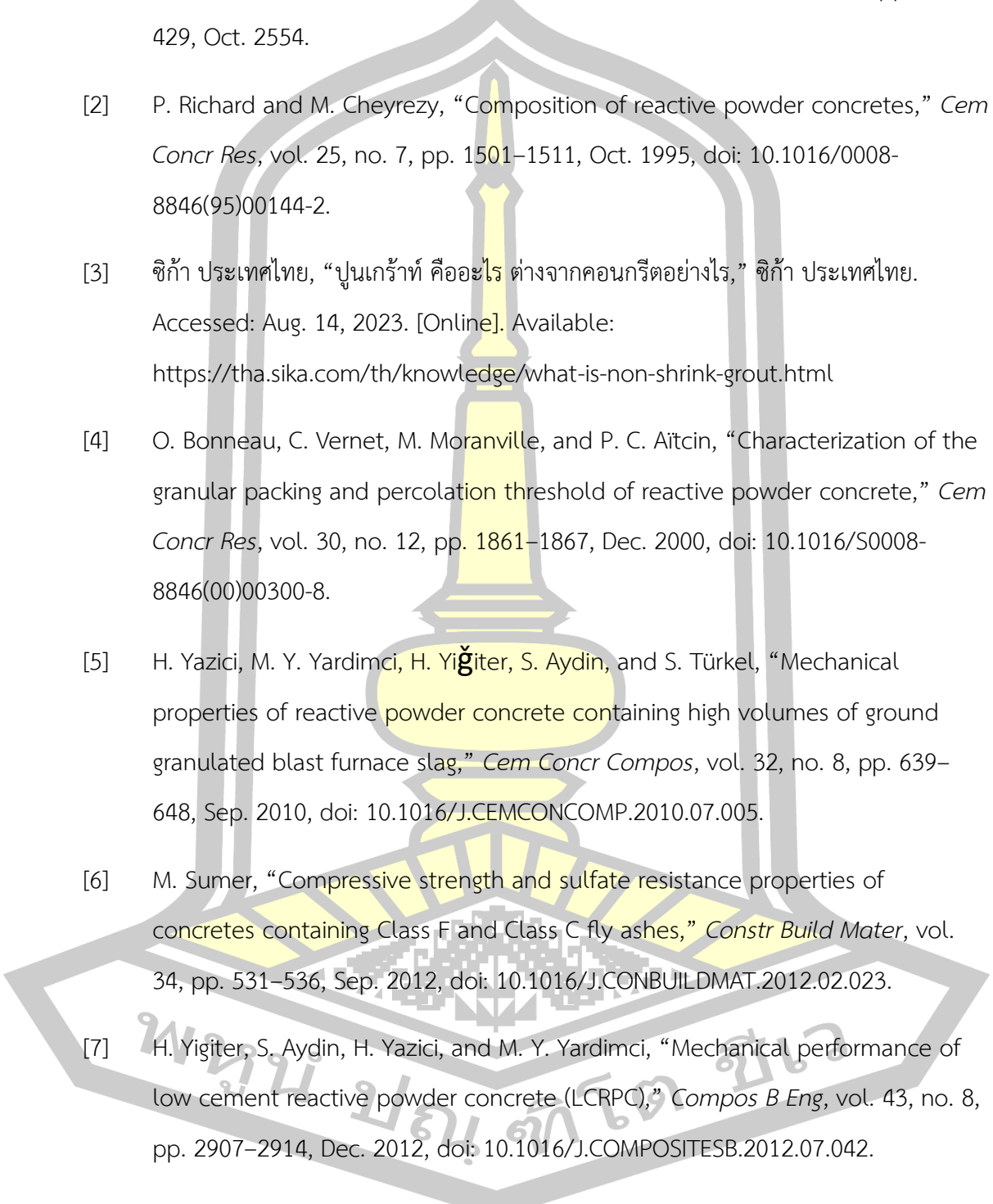
10. การประเมินราคาของ RPC ราคามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60%, 40% และ 20% ราคาเท่ากับ 16,568, 16,853 และ 17,147 THB/ m^3 ลดลงประมาณ 30%, 29% และ 28% ตามลำดับ ของสัดส่วนอ้างอิง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาคุณสมบัติด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การหดตัว หรือการต้านทานซัลเฟต
2. ควรมีการศึกษาการใช้วัสดุป่อโซลารันชนิดอื่นๆ
3. ควรมีการศึกษาการลดปริมาณเส้นใยเหล็กของเถ้าลอยปริมาณอื่น ๆ

บรรณานุกรม



- 
- [1] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, เอกพล บุญมาเลิศ, and ณัฏฐ์ มากุล, “สมบัติเชิงกลและความทนทานของ Reactive Powder Concrete,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, vol. 34, no. 4, pp. 415–429, Oct. 2554.
- [2] P. Richard and M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes,” *Cem Concr Res*, vol. 25, no. 7, pp. 1501–1511, Oct. 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00144-2.
- [3] ชิก้า ประเทศไทย, “ปูนเกร้าท์ คืออะไร ต่างจากคอนกรีตอย่างไร,” ชิก้า ประเทศไทย. Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://tha.sika.com/th/knowledge/what-is-non-shrink-grout.html>
- [4] O. Bonneau, C. Vernet, M. Moranville, and P. C. Aïtcin, “Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete,” *Cem Concr Res*, vol. 30, no. 12, pp. 1861–1867, Dec. 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00300-8.
- [5] H. Yazici, M. Y. Yardimci, H. Yiğiter, S. Aydin, and S. Türkel, “Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag,” *Cem Concr Compos*, vol. 32, no. 8, pp. 639–648, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2010.07.005.
- [6] M. Sumer, “Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing Class F and Class C fly ashes,” *Constr Build Mater*, vol. 34, pp. 531–536, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.023.
- [7] H. Yigiter, S. Aydin, H. Yazici, and M. Y. Yardimci, “Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC),” *Compos B Eng*, vol. 43, no. 8, pp. 2907–2914, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2012.07.042.
- [8] W. Ge *et al.*, “Study on the workability, mechanical property and water absorption of reactive powder concrete,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01777, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.CSCM.2022.E01777.

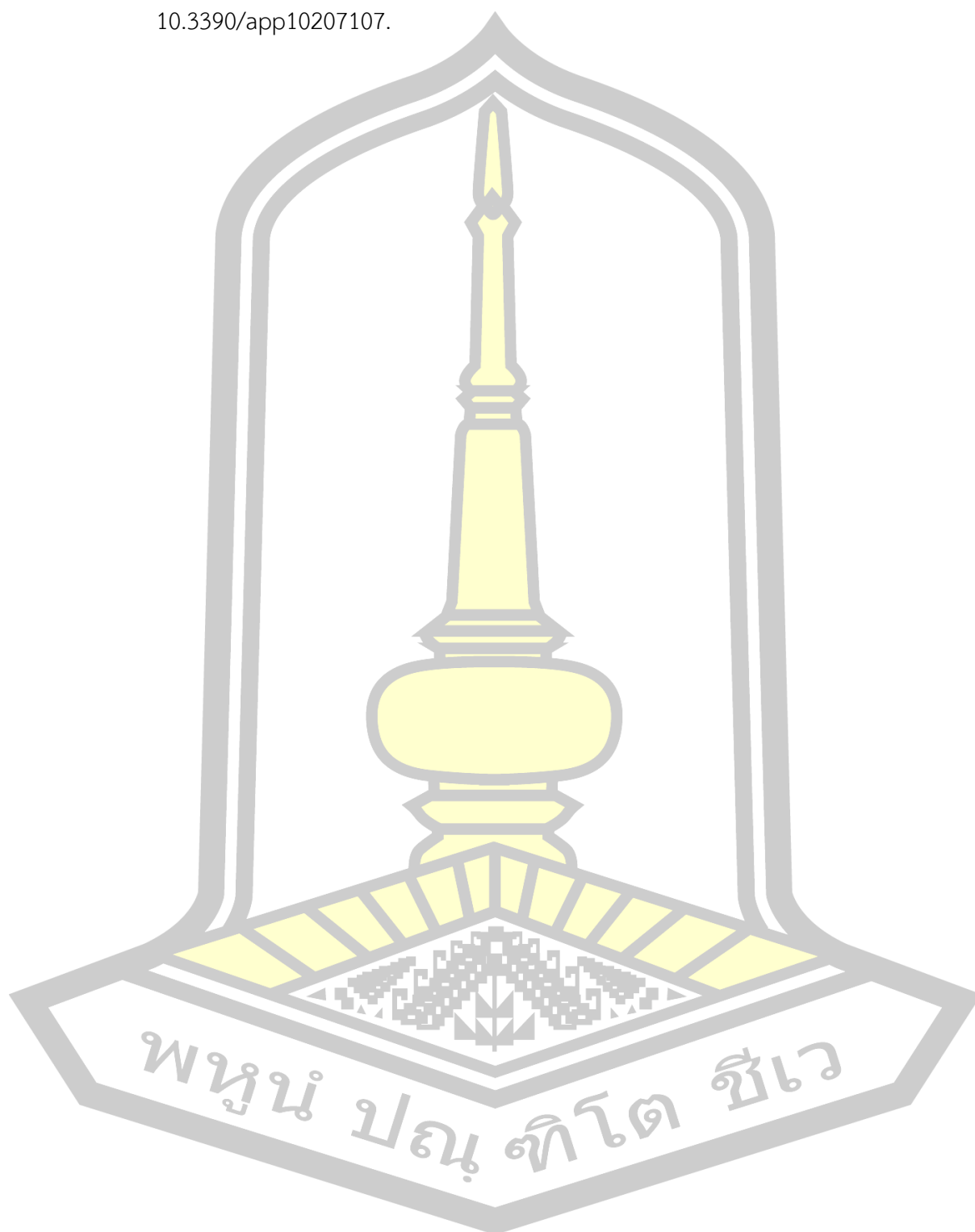
- [9] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, รัชชัย คงศักดิ์ตระกูล, and ณรงค์ศักดิ์ มากุล, “คุณสมบัติพื้นฐานของ Reactive Powder Concrete,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, vol. 31, no. 1, 2551.
- [10] CPAC Concrete Academy, “คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology,” CPAC Concrete Academy. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063>
- [11] สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย TCMA, “ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก,” สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย TCMA. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.thaicma.or.th/th/environmentally/environment/environmentally_friendly_cement_products
- [12] ปิณฑ ปานถาวร และ อภินันท์ บัณฑิตกุล, “สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต,” Chemical Admixtures for Concrete, National Ready Mixed Concrete Association U.S.A. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0141>
- [13] Z. Wu, C. Shi, W. He, and D. Wang, “Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements,” *Cem Concr Compos*, vol. 79, pp. 148–157, May 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.02.010.
- [14] ดร. ศรชล โยริยะ, อังคณา ชุมภู, and ภัทริชา เทพศรี, “เซโนสเฟียร์จากเถ้าลอย Cenospheres Separation from Fly Ash,” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สวทช. Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.mtec.or.th/research-projects-24219/>
- [15] J. Del-Valle-Corte, P. Orosa, M. Aspilcueta, A. R. Pasandín, I. Pérez, and J. E. Haddock, “Effects of classes C and F fly ashes on the viscoelastic behavior of cold mix asphalt (CMA),” *Constr Build Mater*, vol. 472, p. 140796, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.140796.

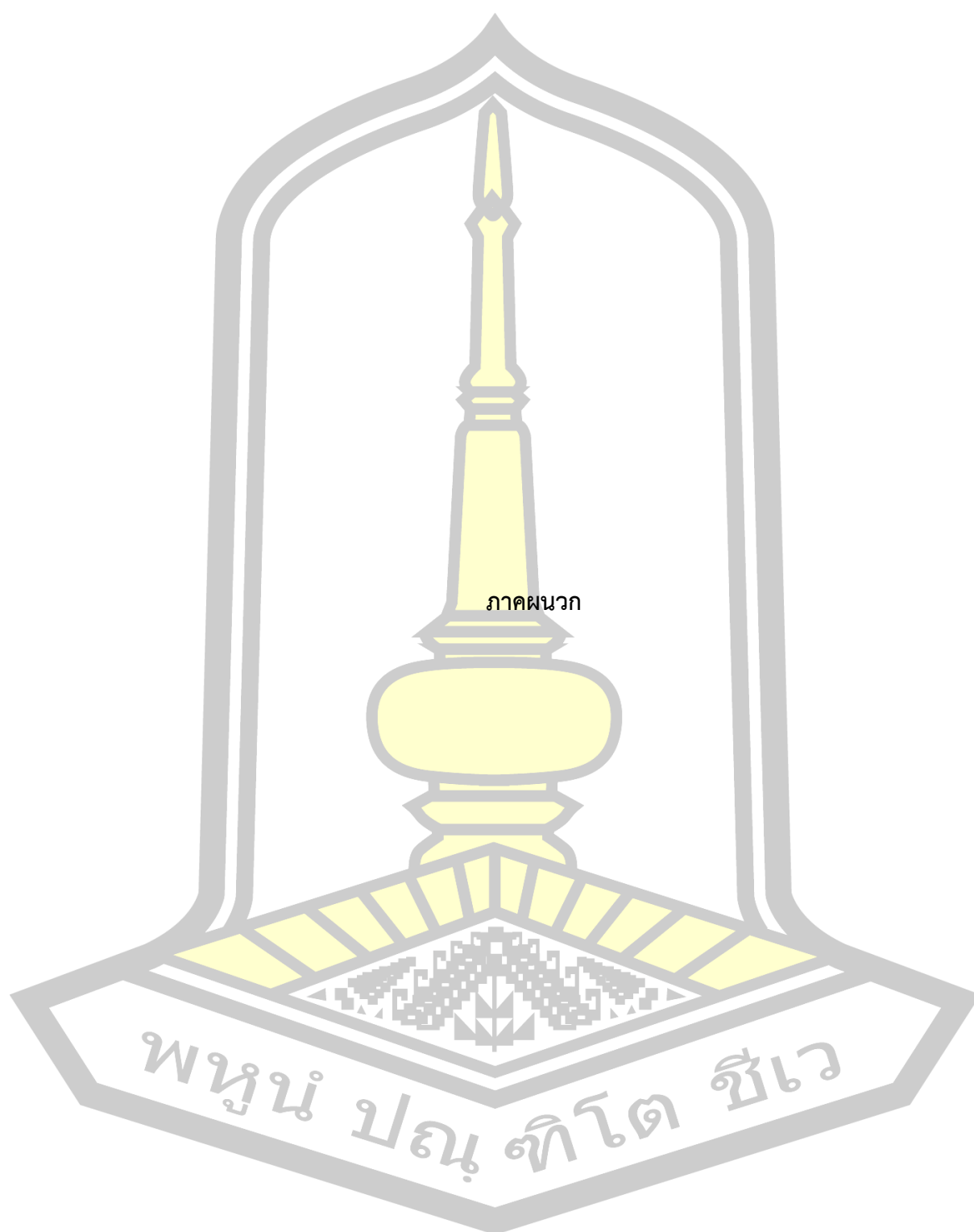
- [16] H. Yazici, H. Yiğiter, A. Ş. Karabulut, and B. Baradan, "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete," *Fuel*, vol. 87, no. 12, pp. 2401–2407, Sep. 2008, doi: 10.1016/J.FUEL.2008.03.005.
- [17] M. G. Sohail, R. Kahraman, N. Al Nuaimi, B. Gencturk, and W. Alnahhal, "Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101669, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101669.
- [18] Z. F. Muhsin and N. M. Fawzi, "Effect of Fly Ash on Some Properties of Reactive Powder Concrete," *Journal of Engineering*, vol. 27, no. 11, pp. 32–46, Nov. 2021, doi: 10.31026/j.eng.2021.11.03.
- [19] ภัทรพร พรเทพเกษมสันต์, อมรชัย ไชยงค์, and เพชรรัตน์ ลิ้มสุปรีyarัตน์, "Evaluation of Carbon Dioxide Emission for Ready-Mixed Concrete Production," *The 30th National Convention on Civil Engineering*, Prachuap Khiri Khan, May 30, 2025.
- [20] สถาบันการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, "Carbon Footprint for Organization : CFO," Apr. 2013. Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: <https://km.fti.or.th/wp-content/uploads/2023/05/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%9F%E0%B8%B8%E0%B8%95%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B8%97%E0%B9%8C%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B9%8C%E0%B8%81%E0%B8%A3% Carbon-Footprint-for-Organization-CFO.pdf>
- [21] ASTM C 1437-07, "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

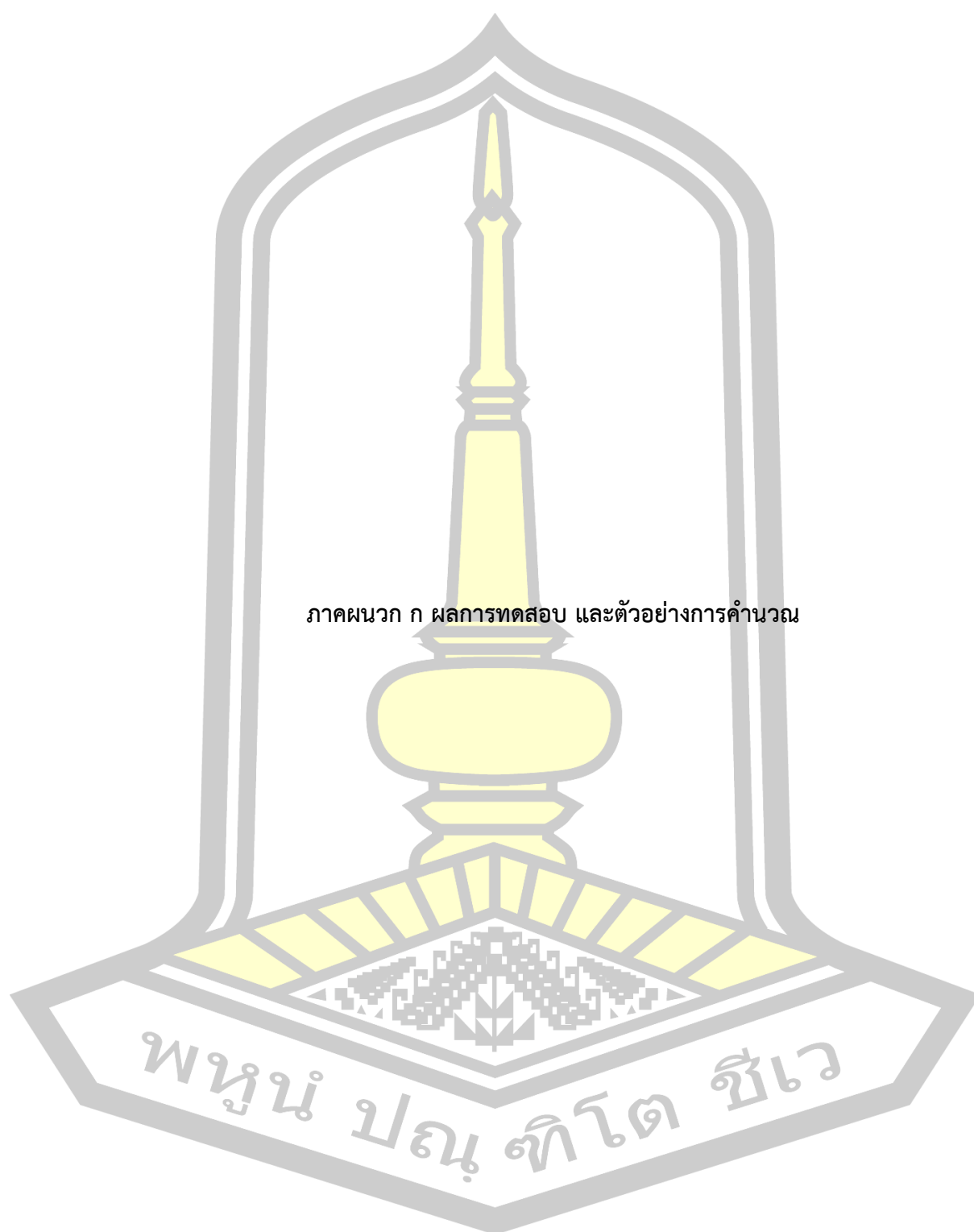
- [22] ASTM C 109/C 109M-02, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [23] BS 1881-166:1983, "Testing concrete — Part 116: Method for determination of compressive strength of concrete cubes," British Standards Institution, London, Jan. 1983.
- [24] ASTM C 496/C 496M – 04, "Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [25] ASTM C 78– 08, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
- [26] ASTM C 1585–04, "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [27] ASTM C 1202–97, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ASTM, West Conshohocken, PA, 1997.
- [28] S. Moula, A. Ben Fraj, T. Wattez, M. Bouasker, and N. B. Hadj Ali, "Mechanical properties, carbon footprint and cost of ultra-high performance concrete containing ground granulated blast furnace slag," *Journal of Building Engineering*, vol. 79, p. 107796, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.107796.
- [29] Wojciech KUBISSA, Roman JASKULSKI, Jiajian CHEN, Pui-Lam NG, Wioletta GODLEWSKA, and Pavel REITERMAN, "EVALUATION OF ECOLOGICAL CONCRETE USING MULTI-CRITERIA ECOLOGICAL INDEX AND PERFORMANCE INDEX APPROACH," *Civil Engineering Environment*, Mar. 2019, doi: 10.21307/ACEE-2019-009.

- [30] Y. Shi, G. Long, X. Zen, Y. Xie, and T. Shang, "Design of binder system of eco-efficient UHPC based on physical packing and chemical effect optimization," *Constr Build Mater*, vol. 274, p. 121382, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121382.
- [31] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), "Emission Factor (CFP)," องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). Accessed: Sep. 25, 2025. [Online]. Available: https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWlcxcGMzTnBi_MjQ9
- [32] H. A. Shah, Q. Yuan, and N. Photwichai, "Use of materials to lower the cost of ultra-high-performance concrete – A review," *Constr Build Mater*, vol. 327, p. 127045, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127045.
- [33] S. Monosi, G. Pignoloni, S. Collepardi, R. Troli, and M. Collepardi, "Modified Reactive Powder Concrete with Artificial Aggregates," *American Concrete Insitute*, vol. 195, pp. 447–460, Jan. 2000, doi: 10.14359/9928.
- [34] D. K. Nayak, P. P. Abhilash, R. Singh, R. Kumar, and V. Kumar, "Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies," *Cleaner Materials*, vol. 6, p. 100143, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CLEMA.2022.100143.
- [35] A. Zhang, K. Liu, J. Li, R. Song, and T. Guo, "Static and dynamic tensile properties of ultra-high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid sisal fibers," *Constr Build Mater*, vol. 411, p. 134492, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134492.
- [36] P. S. Dong, N. Van Tuan, L. T. Thanh, N. C. Thang, V. H. Cu, and J. H. Mun, "Compressive strength development of high-volume fly ash ultra-high-performance concrete under heat curing condition with time," *Applied*

Sciences (Switzerland), vol. 10, no. 20, pp. 1–18, Oct. 2020, doi:
10.3390/app10207107.







ก.1 การทดสอบการไหลแผ่

ผลการทดสอบการไหลแผ่ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการไหลแผ่ของแต่ละของทุกสัดส่วนผสม

สัดส่วนผสม	ครั้งที่ (mm)				ค่าเฉลี่ย (mm)
	1	2	3	4	
Ref.SST2	243.83	245.68	247.86	245.46	245.71
FA20MST2	236.97	218.19	235.46	260.35	237.74
FA40MST2	225.1	218.02	226.34	231.67	225.28
FA600MST2	231.77	208.22	215.22	211.29	216.63

ตัวอย่างการคำนวณการไหลแผ่

คำนวณค่าการไหลแผ่จากการวัดระยะจำนวน 4 ครั้งในลักษณะในรูปดอกจัน
จากสมการ

$$\text{ค่าการไหลแผ่เฉลี่ย} = \frac{\text{ผลรวมการวัดระยะ}}{\text{จำนวนครั้งระยะ}}$$

$$\text{ค่าการไหลแผ่เฉลี่ยของสัดส่วนผสม FA40M1} = \frac{\text{ผลรวมการวัดระยะ}}{\text{จำนวนครั้งระยะ}}$$

$$= \frac{(285.98+289.97+287.78+288.02)}{4}$$

$$= 287.94 \text{ mm}$$

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ก.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบการไหลแผ่ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดดังแสดงใน

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	กำลังรับ แรงอัด (MPa)	กำลังรับ แรงอัดเฉลี่ย (MPa)	ค่าสัมประสิทธิ์ การแปรปรวน (%)
Ref.SST2	1	1	61.42	64.32	3.98
		2	65.26		
		3	66.28		
	3	1	100.39	99.72	3.56
		2	102.88		
		3	95.88		
	7	1	109.16	110.15	1.10
		2	111.50		
		3	109.80		
	28	1	121.88	129.25	6.37
		2	138.13		
		3	127.75		
	90	1	163.55	158.31	2.99
		2	157.05		
		3	154.32		
FA20MST2	1	1	31.39	32.55	3.10
		2	33.02		
		3	33.25		
	3	1	95.36	96.79	1.42
		2	98.08		
		3	96.94		

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	กำลังรับ แรงอัด (MPa)	กำลังรับ แรงอัดเฉลี่ย (MPa)	ค่าสัมประสิทธิ์ การแปรปรวน (%)
	7	1	112.22	117.52	149.66
		2	120.72		
		3	119.61		
	28	1	149.62	3.93	0.12
		2	149.86		
		3	149.50		
	90	1	158.11	152.56	3.22
		2	148.77		
		3	150.81		
FA40MST2	1	1	23.87	23.04	3.65
		2	22.20		
		3	23.06		
	3	1	71.00	71.43	0.64
		2	71.92		
		3	71.38		
	7	1	104.66	104.89	3.55
		2	101.29		
		3	108.71		
	28	1	137.86	135.17	2.09
		2	132.21		
		3	135.43		
	90	1	149.36	145.55	2.29
		2	144.03		
		3	143.25		

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	กำลังรับ แรงอัด (MPa)	กำลังรับ แรงอัดเฉลี่ย (MPa)	ค่าสัมประสิทธิ์ การแปรปรวน (%)
FA60MST2	1	1	19.17	19.38	2.94
		2	18.95		
		3	20.02		
	3	1	58.13	58.52	1.59
		2	57.84		
		3	59.58		
	7	1	90.20	90.86	0.99
		2	91.88		
		3	90.50		
	28	1	115.55	117.01	1.51
		2	116.49		
		3	118.98		
	90	1	132.91	136.34	2.26
		2	138.88		
		3	137.23		

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficient of Variation, COV.)

$$\text{Cov. (\%)} = \left(\frac{STD}{\bar{X}} \right) \times 100$$

เมื่อ STD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของทุกตัวอย่างที่ใช้คำนวณ (MPa)

$$STD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

เมื่อ X_i = ค่ากำลังรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่างที่ใช้คำนวณค่าเฉลี่ย (MPa)

n = จำนวนตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของสัดส่วนผสม Ref. ตัวอย่างที่ 1 อายุ 28 วัน

$$STD = \sqrt{\frac{(61.42-64.32)^2 + (65.26-64.32)^2 + (66.28-64.32)^2}{3-1}} = 2.56$$

$$\bar{X} = (61.42 + 65.26 + 66.28) / 3 = 64.32$$

$$COV. (\%) = 2.56 / 64.32 = 3.98$$

การคำนวณกำลังรับแรงอัดของสัดส่วนผสมได้จากสมการ

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

เมื่อ F = กำลังรับแรงอัด (N/mm^2 หรือ MPa)

P = แรงกระทำสูงสุด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดด้านรับแรง (mm^2)

$$\begin{aligned} \text{กำลังรับแรงอัดของสัดส่วนผสม Ref. ตัวอย่างที่ 1 อายุ 28 วัน} &= \frac{157125.01}{2558.36} \\ &= 61.42 \text{ MPa} \end{aligned}$$

ก.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ผลการทดสอบกำลังรับดึงแบบผ่าซีกดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบดึงแบบผ่าซีก

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึง แบบผ่าซีก (MPa)	กำลังรับแรงดึง แบบผ่าซีกเฉลี่ย (MPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การ แปรปรวน (%)
Ref.SST2	28	1	18.00	17.26	3.77
		2	17.01		
		3	16.77		
FA20MST2	28	1	21.21	22.05	5.08
		2	21.62		
		3	23.32		
FA40MST2	28	1	19.84	20.19	1.54
		2	20.42		
		3	20.32		
FA60MST2	28	1	16.06	16.06	1.37
		2	15.84		
		3	16.28		

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของสัดส่วนผสมได้จากสมการ

$$T = \frac{2P}{\pi LD}$$

เมื่อ T = กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (N/mm^2)

P = แรงกระทำสูงสุด (N)

L = ความยาวของตัวอย่างทรงกระบอก (mm)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทรงกระบอก (mm)

$$\text{กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของสัดส่วนผสม Ref. ตัวอย่างที่ 1 อายุ 28 วัน} = \frac{2 \times 493821.68}{\pi \times 201.24 \times 99.71}$$

$$= 15.67 \text{ MPa}$$

ก.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังรับดัดแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดัด (MPa)	กำลังรับแรงดัด เฉลี่ย (MPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การ แปรปรวน (%)
Ref.SST2	28	1	16.83	16.35	2.69
		2	16.26		
		3	15.97		
FA20MST2	28	1	21.14	21.69	6.36
		2	23.26		
		3	20.68		
FA40MST2	28	1	23.20	22.67	2.07
		2	22.46		
		3	22.34		
FA60MST2	28	1	14.00	14.94	5.89
		2	15.75		
		3	15.07		

พหุ ประจักษ์ ชีวะ

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณกำลังรับแรงดัดของสัดส่วนผสมจากสมการตามกรณีดังนี้

กรณีที่ 1) รอยร้าวของตัวอย่างแตกอยู่ในช่วงกลาง

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

กรณีที่ 2) รอยร้าวของตัวอย่างไม่แตกอยู่ในช่วงกลาง

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

เมื่อ R = โมดูลัสการแตกร้าว (N/mm^2)

P = แรงกระทำสูงสุด (N)

L = ความยาวคาน (mm)

b = ความกว้างเฉลี่ยของคาน (mm)

d = ความลึกเฉลี่ยของคาน (mm)

a = ระยะเฉลี่ยของรอยแตกกับฐานรองรับคานด้านใกล้ที่สุด (mm)

$$\text{กำลังรับแรงดัดของสัดส่วนผสม Ref. ตัวอย่างที่ 1 อายุ 28 วัน} = \frac{34141.22 \times 210}{73.71 \times 76.02^2}$$

$$= 16.83 \text{ MPa}$$

พูน ปณ จิโต ชีเว

ก.5 การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

สัดส่วนผสม	Initial water absorption		Secondary water absorption	
	R	อัตราการดูดซึมน้ำ ($10^{-4}\text{Sec}^{1/2}$)	R	อัตราการดูดซึมน้ำ ($10^{-4}\text{Sec}^{1/2}$)
Ref.	0.99*	11.90	0.99	5.83
	0.99	10.80	1.00	4.29
	0.99*	11.78	1.00	5.50
FA20M2	0.98*	7.81	0.99	2.46
	0.98*	8.64	0.98	2.63
	0.98	11.25	0.98	2.19
FA40M2	0.98	10.07	0.99	3.37
	0.99*	7.73	1.00	2.76
	0.99*	8.43	1.00	2.44
FA60M2	0.99	11.78	1.00	6.53
	0.99*	13.19	1.00	5.99
	1.00*	12.84	1.00	6.32

* หมายเหตุ ใช้ค่าเฉลี่ยจำนวน 2 ค่า โดยค่าที่มีเครื่องหมายดอกจันจะนำไปวิเคราะห์ผล



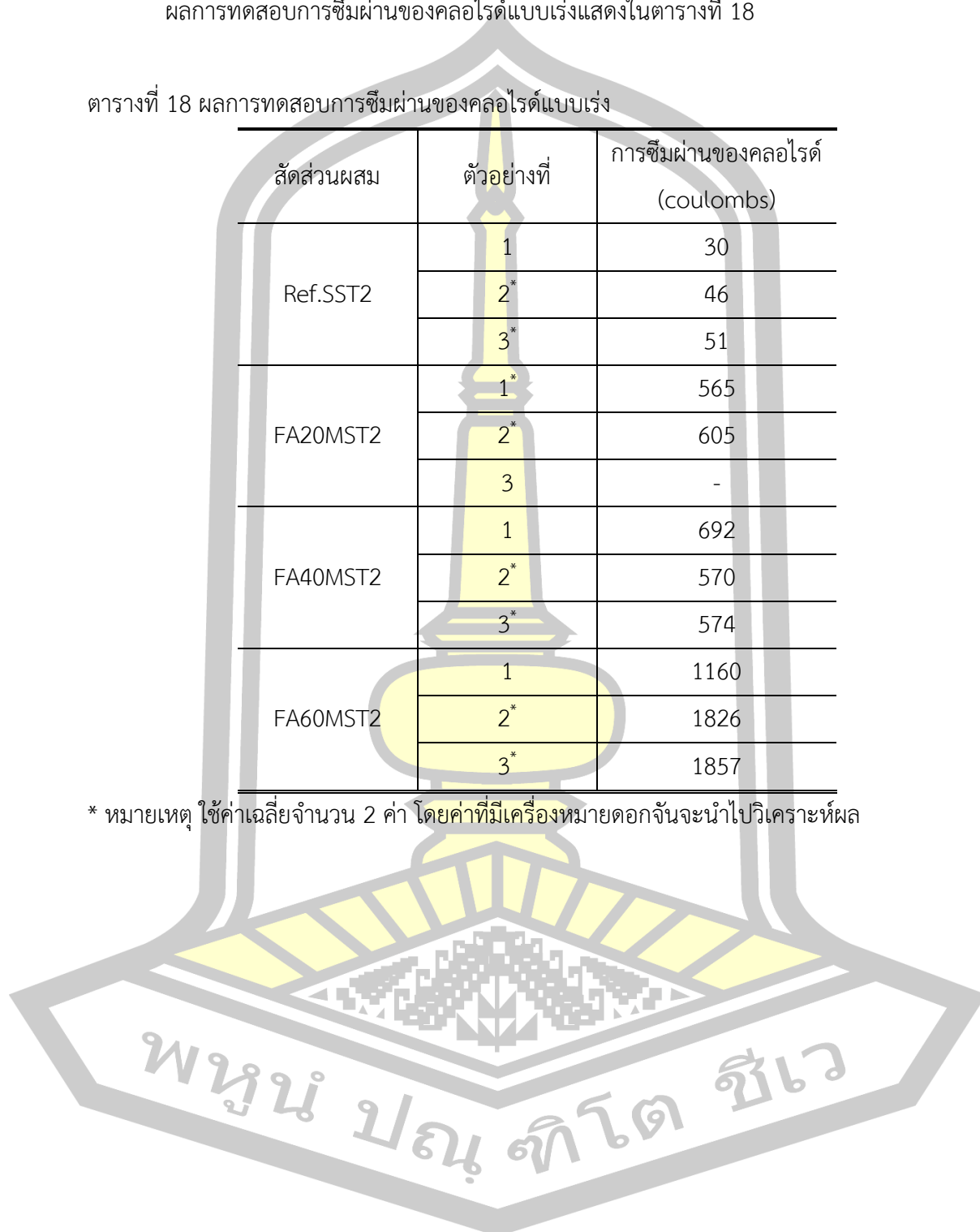
ก.6 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง

ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่งแสดงในตารางที่ 18

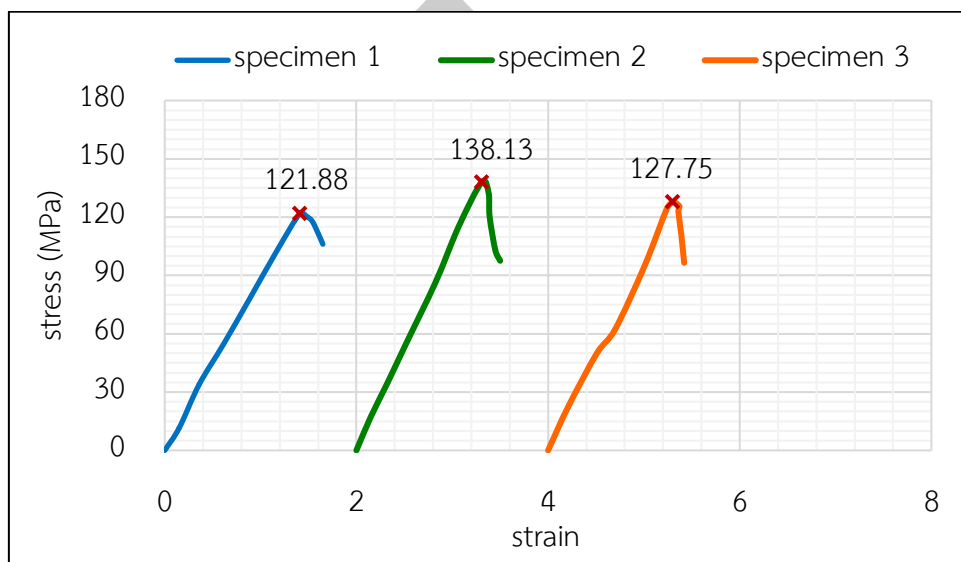
ตารางที่ 18 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง

สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	การซึมผ่านของคลอไรด์ (coulombs)
Ref.SST2	1	30
	2*	46
	3*	51
FA20MST2	1*	565
	2*	605
	3	-
FA40MST2	1	692
	2*	570
	3*	574
FA60MST2	1	1160
	2*	1826
	3*	1857

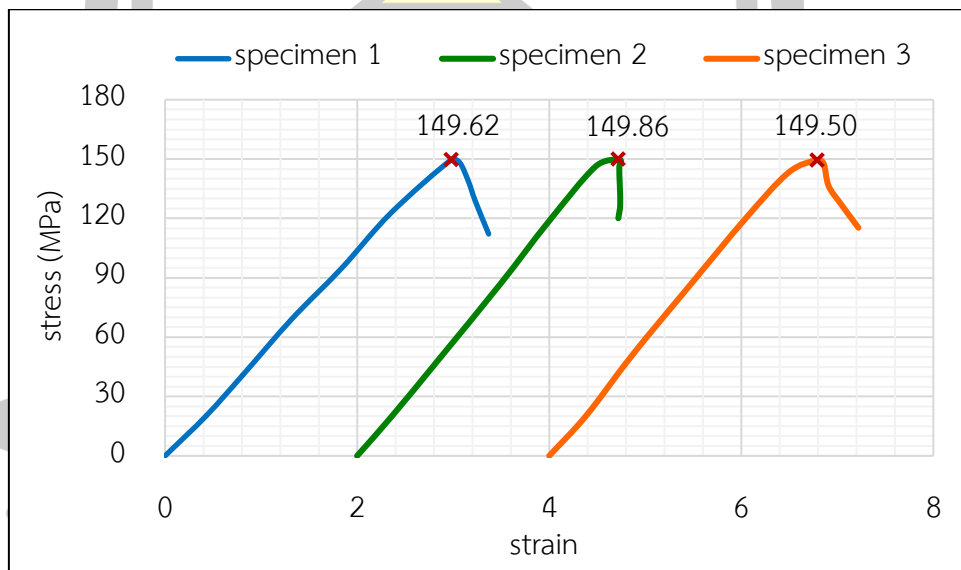
* หมายถึง ใช้ค่าเฉลี่ยจำนวน 2 ค่า โดยค่าที่มีเครื่องหมายดอกจันจะนำไปวิเคราะห์ผล



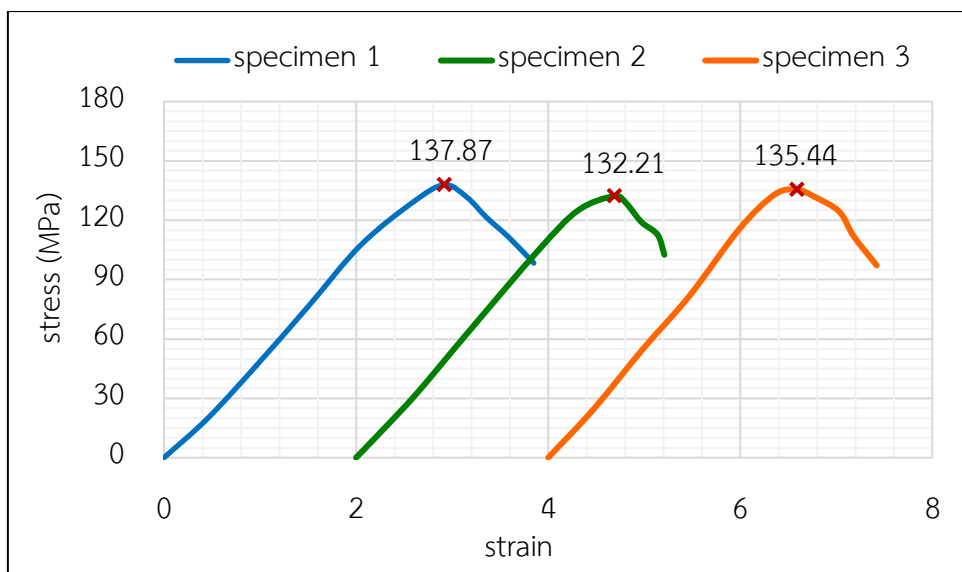
ก.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของกำลังรับแรงอัด



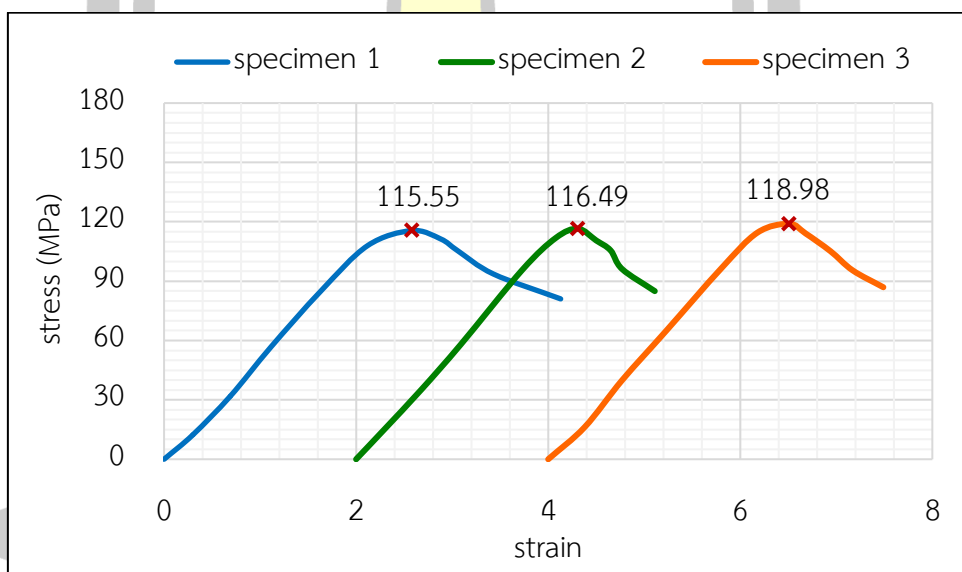
รูปที่ 45 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 46 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของสัดส่วนผสม FA20MST2 ที่อายุ 28 วัน

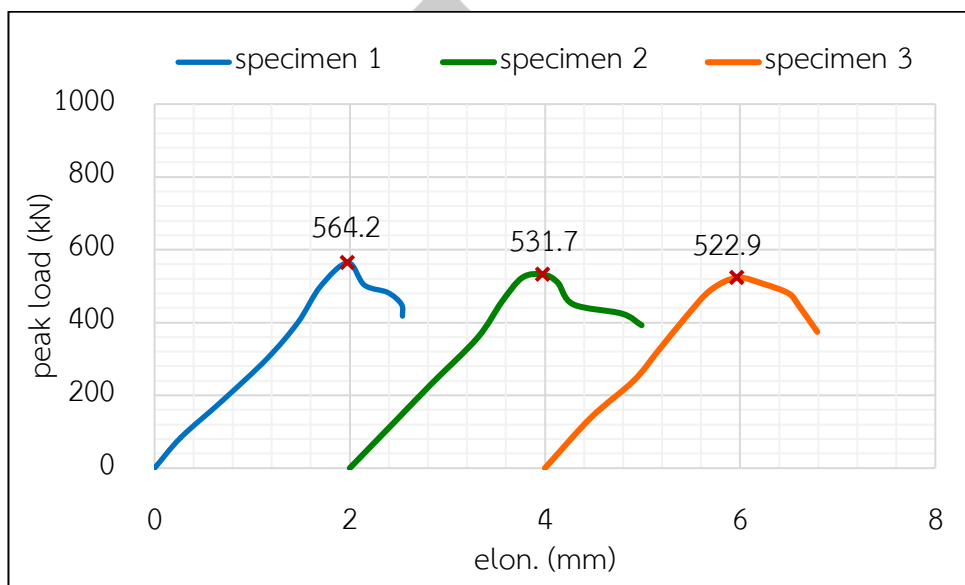


รูปที่ 47 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain
ของสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่อายุ 28 วัน

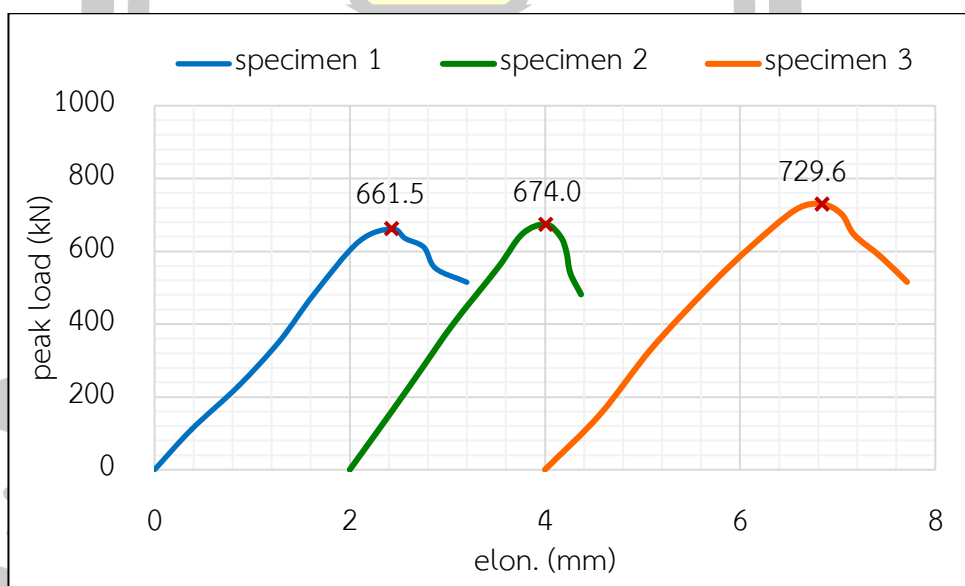


รูปที่ 48 กราฟกำลังรับแรงอัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain
ของสัดส่วนผสม FA60MST2 ที่อายุ 28 วัน

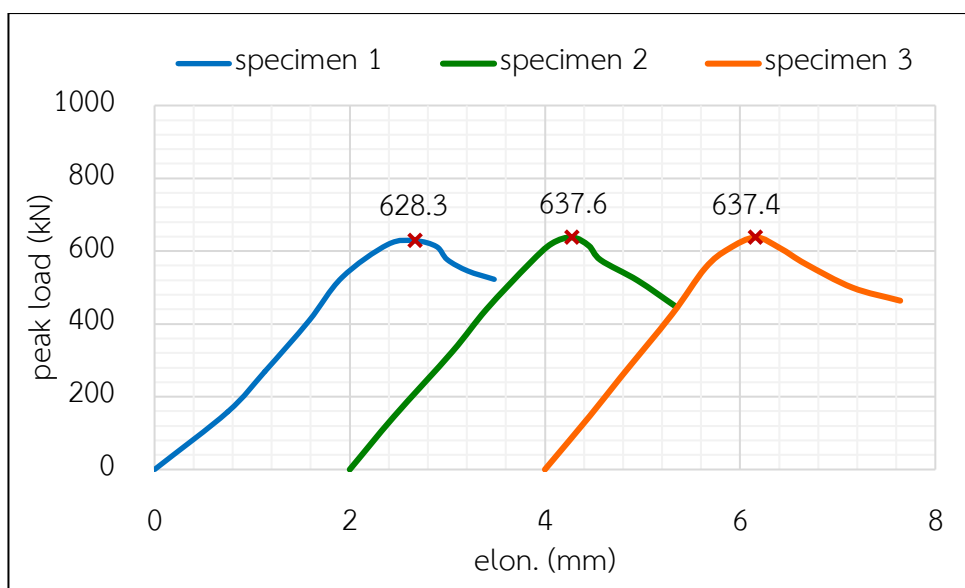
ก.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก



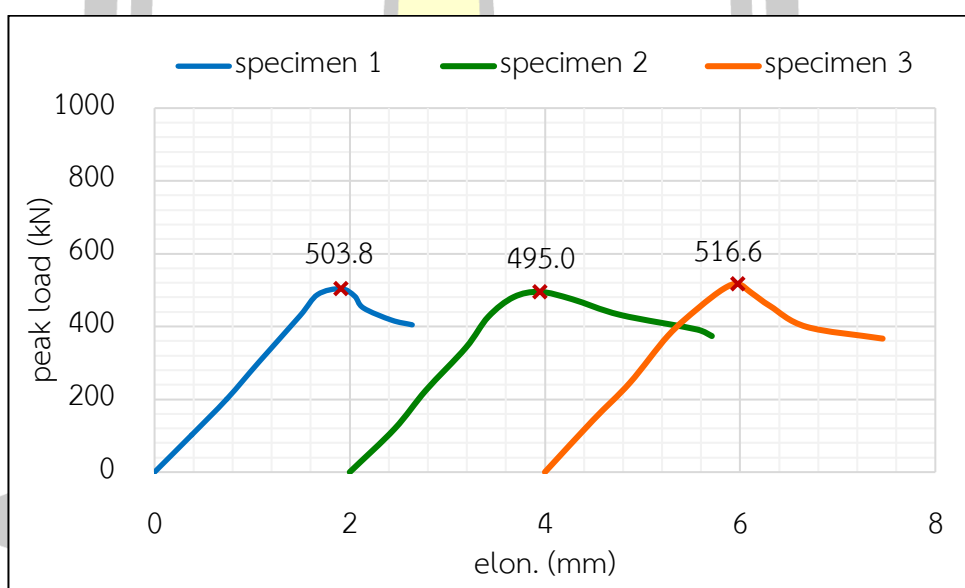
รูปที่ 49 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 50 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA20MST2 ที่อายุ 28 วัน

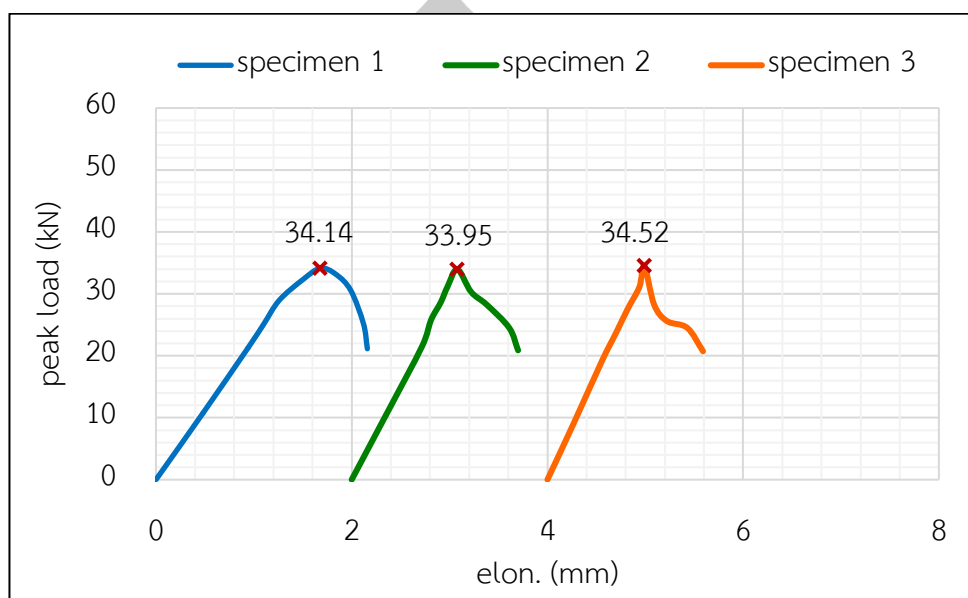


รูปที่ 51 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon.
ของสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่อายุ 28 วัน

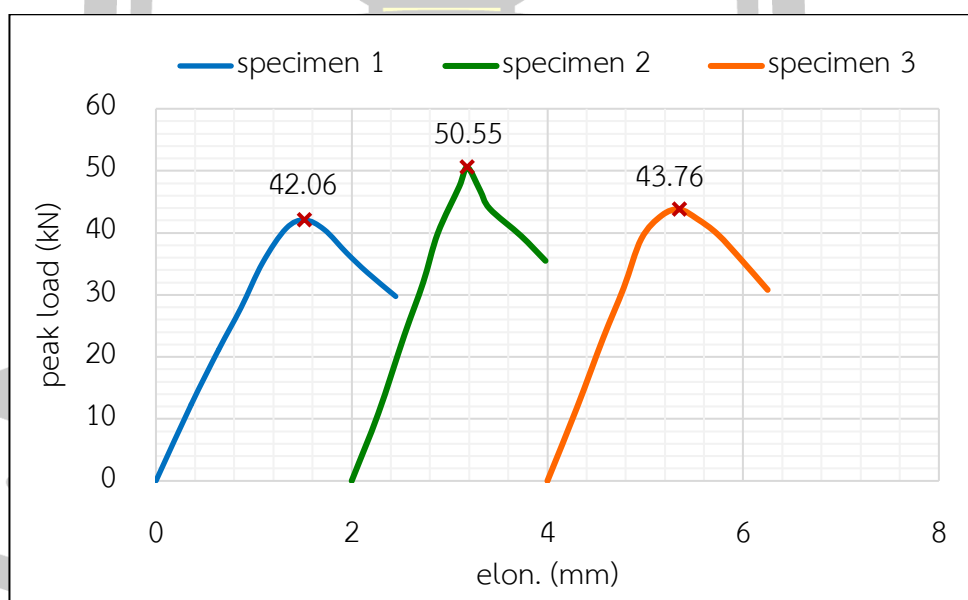


รูปที่ 52 กราฟกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon.
ของสัดส่วนผสม FA60MST2 ที่อายุ 28 วัน

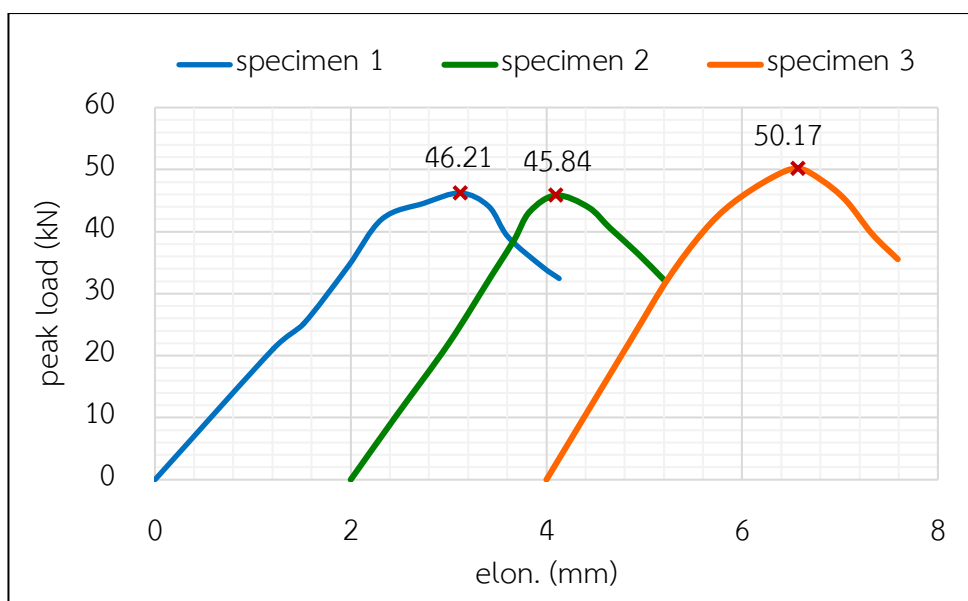
ก.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของกำลังรับแรงดัด



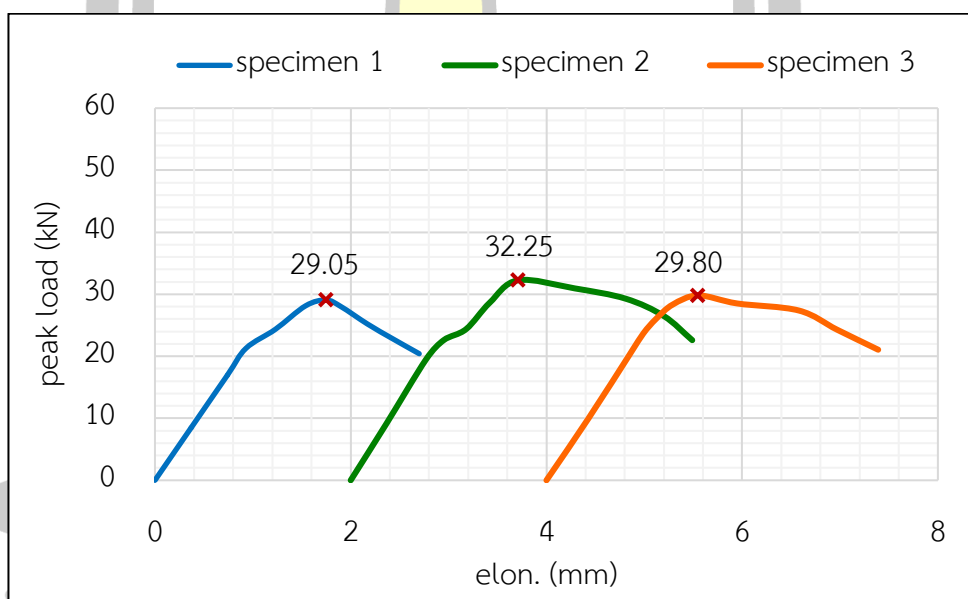
รูปที่ 53 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม Ref.SST2 ที่อายุ 28 วัน



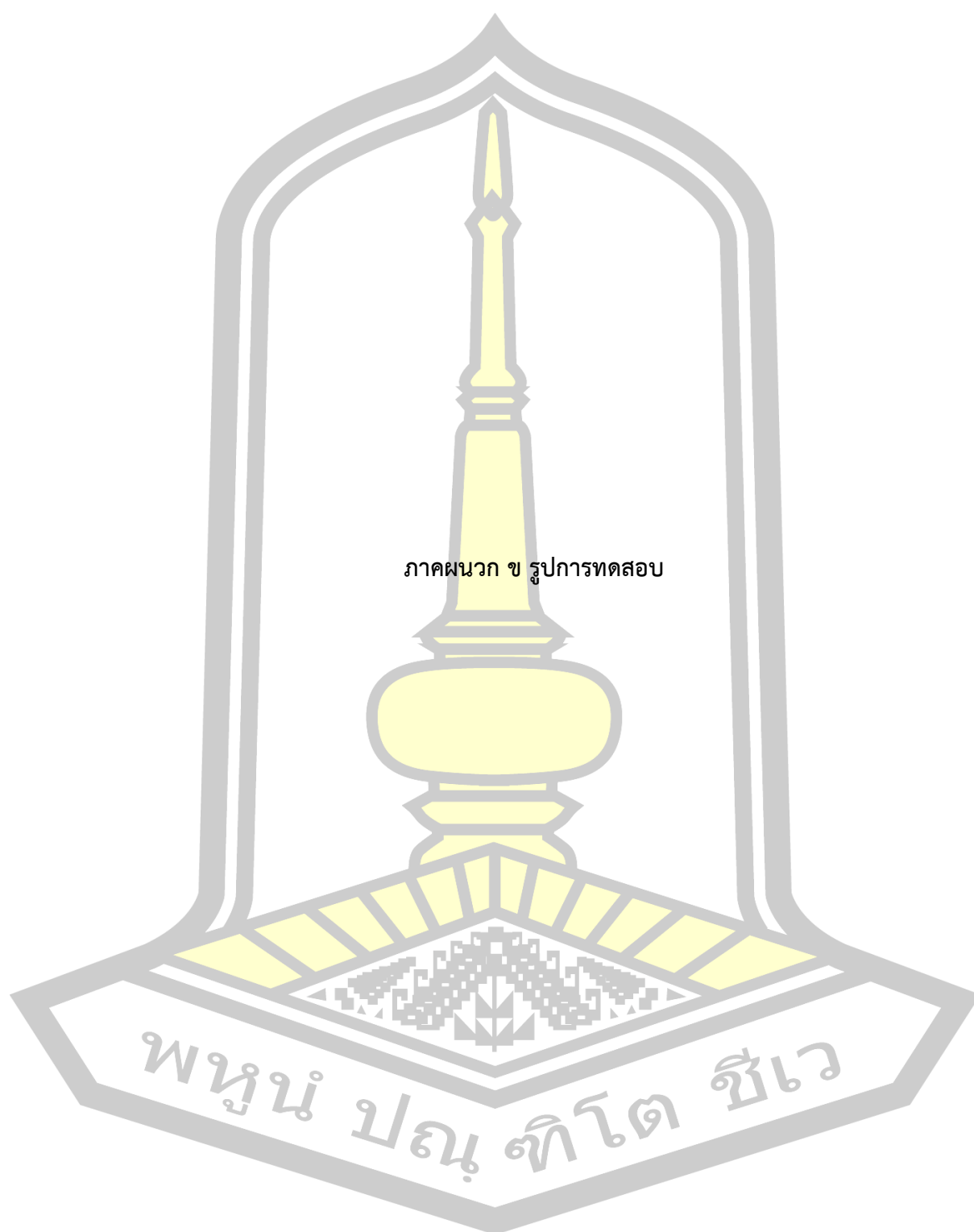
รูปที่ 54 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon. ของสัดส่วนผสม FA20MST2 ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 55 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon.
ของสัดส่วนผสม FA40MST2 ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 56 กราฟกำลังรับแรงดัดแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง peak load และ elon.
ของสัดส่วนผสม FA60MST2 ที่อายุ 28 วัน



ข.1 การทดสอบการไหลแผ่



รูปที่ 57 ตัวอย่างการวัดค่าทดสอบการไหลแผ่

ข.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 58 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 59 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 60 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 61 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 62 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 63 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 64 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 65 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 66 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

พูน ปณ จิต ชเว



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 67 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 68 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 69 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



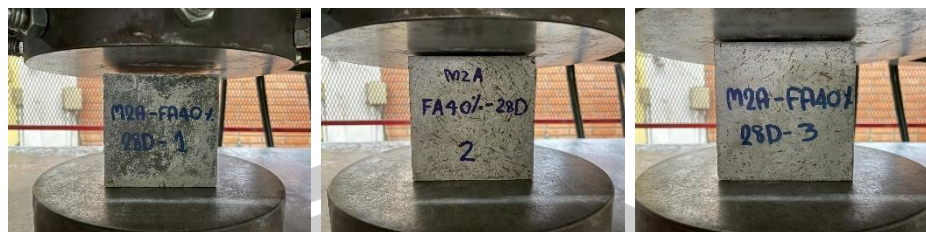
(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 70 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

พูน ปณ ทิโต ชเว



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 71 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 72 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

พหุ ประสิทธิภาพ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 73 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 1 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 74 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

พูน ปณ ทิโต ชเว



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 75 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 76 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

พหุ ประสิทธิภาพ



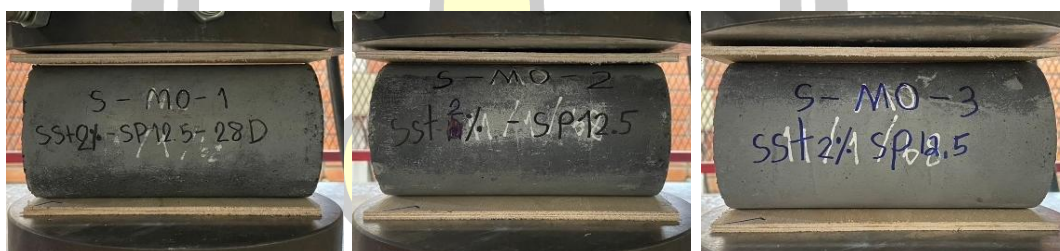
(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 77 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงอัดที่ 90 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

ข.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 78 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 79 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 80 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 81 ตัวอย่าง FA60MST2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

ข.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 82 ตัวอย่าง Ref.SST2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 83 ตัวอย่าง FA20MST2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 84 ตัวอย่าง FA40MST2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

พูน ปณ ทิโต ชีเว



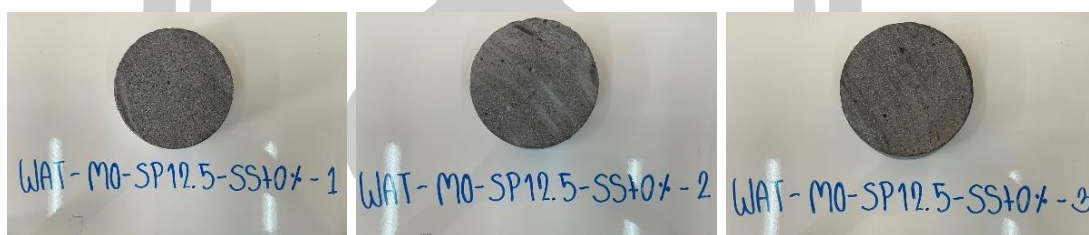
(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



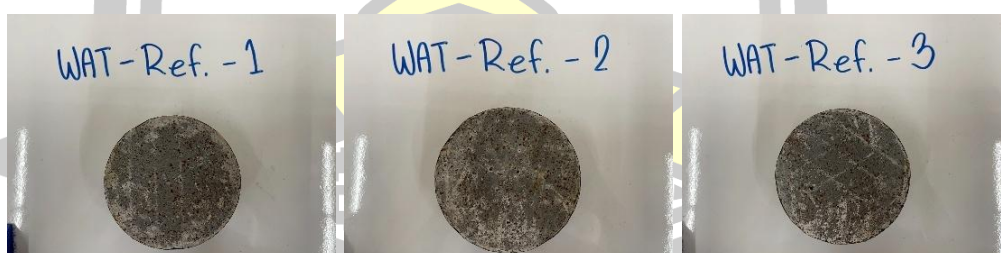
(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 85 ตัวอย่าง FA60MSR2 กำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

ข.5 การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

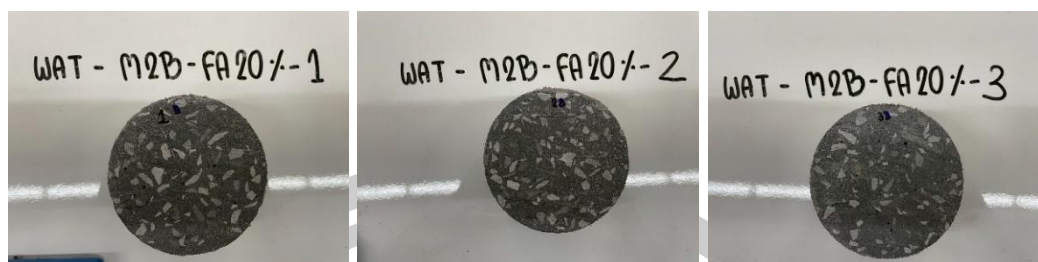


(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ

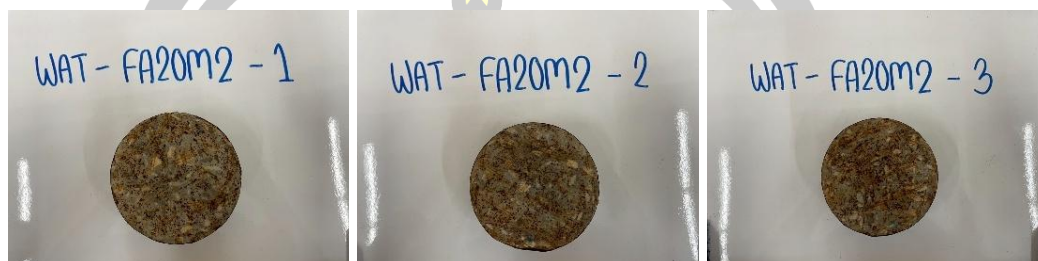


(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 86 ตัวอย่าง Ref.SST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

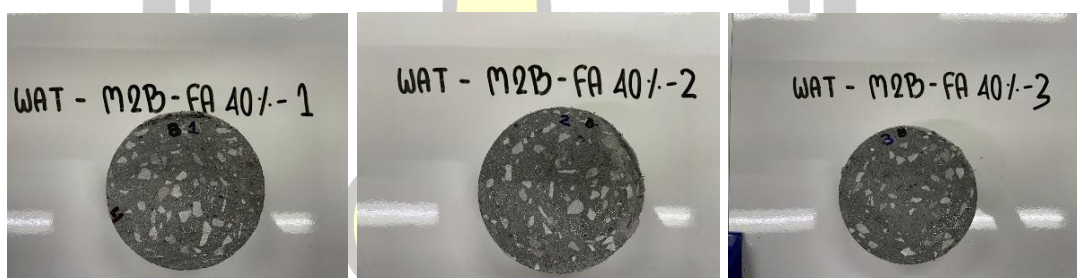


(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ

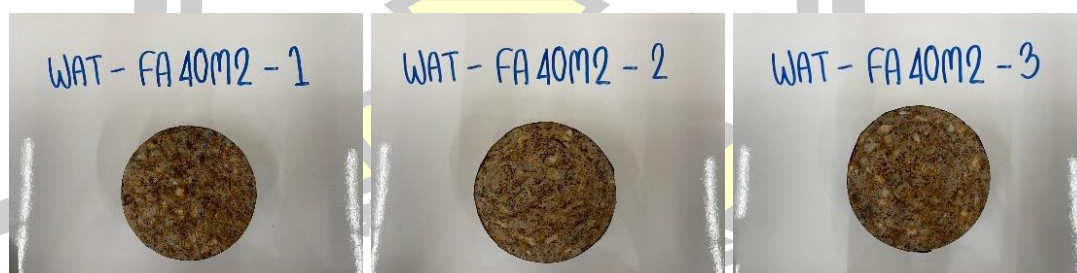


(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 87 ตัวอย่าง FA20MST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 88 ตัวอย่าง FA40MST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 89 ตัวอย่าง FA60MST2 อัตราการดูดซึมน้ำ โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

ข.6 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 90 ตัวอย่าง Ref.SST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 91 ตัวอย่าง FA20MST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ

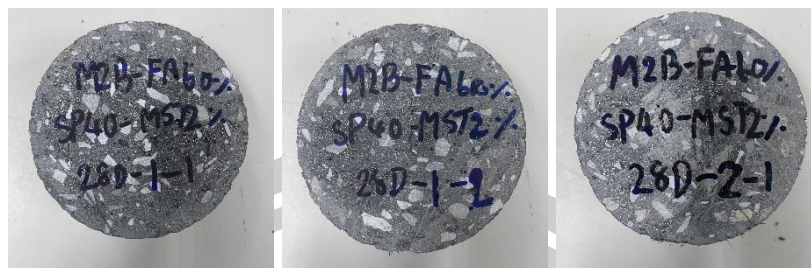


(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 92 ตัวอย่าง FA40MST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



(a) ตัวอย่างก่อนทดสอบ



(b) ตัวอย่างหลังทดสอบ

รูปที่ 93 ตัวอย่าง FA60MST2 การซึมผ่านของคลอไรด์แบบเร่ง โดย (a) ก่อนทดสอบ และ (b) หลังทดสอบ



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	พลายชุมพล แป้นใหญ่
วันเกิด	9 กรกฎาคม 2536
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	31/1 หมู่ที่ 7 ต.หน้าไม้ อ.ลาดหลุมแก้ว จ.ปทุมธานี 12140
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนคณะราษฎรบำรุงปทุมธานี ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี พ.ศ. 2559 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2568 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรม โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	การผลิตบล็อกประสานจากตะกอนน้ำประปา การพัฒนาไร้อีแคทีฟพาวเดอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณสูง

พูน ปณ ทัต ชีเว