

ผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

EFFECT OF ALKALINE ACTIVATOR ON COMPRESSIVE STRENGTH
OF PALM OIL FUEL ASH MOTAR

กฤติยา วงษ์ไพศาล

ภัทรภรณ์ บ่อทรัพย์

โครงการวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2561

ปริญญานิพนธ์ ผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

โดย นางสาวกฤติยา วงษ์ไพศาล

นางสาวภัทรภรณ์ บ่อทรัพย์

อาจารย์ที่ปรึกษาอาจารย์ ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ

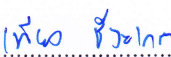
จำนวนหน้า 69 หน้า

ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติ
ปริญญานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา


.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

(อาจารย์ ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ)

คณะกรรมการสอบโครงการงาน


.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ)


.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี)


.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรค์)

บทคัดย่อ

โครงการนี้มุ่งศึกษาผลการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน ในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันนี้ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง โดยโครงการนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ และแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ใช้ทรายแห้งที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เป็นมวลรวม โดยใช้อัตราส่วน เถ้าปาล์มน้ำมัน : ทราย เท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม³ ทำการถอดแบบหลังหล่อตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และทำให้กำลังอัดดีขึ้น โดยสังเกตจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น และเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30, 40 และ 50 ส่งผลให้กำลังอัดลดลงรวมไปถึงการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: กำลังอัด โซเดียมไฮดรอกไซด์ เถ้าปาล์มน้ำมัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มอร์ตาร์

Abstract

This project aims to study the effect of sodium hydroxide solution concentration on compressive strength of mortar mixed with ungrounded palm oil fuel ash blended with Portland cement type I at the replacement rate of 20, 30, 40 and 50 percent by weight of binder. Binder to sand ratio was controlled to be 1:2.75 by weight. Sodium hydroxide solution concentrations were varied at 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 and 1.75 molars. Mortar cube specimens of 50x50x50 mm³ were cast and tested for compressive strength at 3, 7, 14 and 28 days.

The results showed that higher amount of palm oil fuel ash led to lower compressive strength. Based on the study, the mortar with 20 % palm oil fuel ash and 0.50 molar – NaOH concentration yielded the highest compressive strength.

Keywords: Compressive strength, Mortar, NaOH (Sodium hydroxide), Palm oil fuel ash, Portland cement type I

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจากอาจารย์ ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำ และความคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำปริญญาานิพนธ์มาโดยตลอด และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรค์ ที่รับหน้าที่เป็นกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธาที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนการทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กฤติยา วงษ์ไพศาล

ภัทรารภรณ์ บ่อทรัพย์

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material)	4
2.1.1 ปฏิกริยาปอซโซลานิก	6
2.2 เถ้าปาล์มน้ำมัน	7
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน	8
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน	9
2.2.3 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตสด	10
2.2.4 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	11
2.2.5 ข้อเสนอแนะในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีต	12
2.3 ปูนซีเมนต์	12
2.3.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13

2.3.2 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	15
2.3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	17
2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	20
2.4.1 ลักษณะเฉพาะของโซดาไฟ	21
2.4.2 การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์	21
2.4.3 ประโยชน์โซเดียมไฮดรอกไซด์	23
2.4.4 อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม	24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	39
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	39
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ	40
3.3 วิธีการดำเนินการโครงการงาน	42
3.3.1 การหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์	45
3.3.2 การทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้าร์.....	45
3.3.3 การคำนวณค่าการไหลแผ่	46
3.3.4 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์	47
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	49
4.1 สมบัติของปูนซีเมนต์และ เถ้าปาล์มน้ำมัน	49
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	49
4.1.2 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ	49
4.1.3 ลักษณะรูปร่างอนุภาค	50
4.1.4 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ.....	52
4.1.5 ความละเอียด.....	52

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	53
4.3 สมบัติของมวลรวม	53
4.4 ต่างเร่งปฏิกิริยา	54
4.5 สมบัติของมอร์ต้าร์	54
4.5.1 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์	54
4.5.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์	58
4.5.3 ผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์	63
บทที่ 5 สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผล	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
บทความ	84
ประวัติย่อของผู้จัดทำโครงการ	95

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ 2.1	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดเล็กโดยเครื่องทดสอบ SEM	10
ภาพที่ 2.2	แคลเซียมซิลิเกต C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF (Shetty M.S., 1982)	17
ภาพที่ 2.3	ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)	18
ภาพที่ 2.4	แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอทริงไคต์	19
ภาพที่ 2.5	เอทริงไคต์ และ Monosulfate	19
ภาพที่ 2.6	โซดาไฟก้อน	21
ภาพที่ 2.7	การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้เซลล์ปรอท	22
ภาพที่ 2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตควบคุม	26
ภาพที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.40	28
ภาพที่ 2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.45	28
ภาพที่ 2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.50	
ภาพที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการแทนที่และกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน OP	32
ภาพที่ 2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการแทนที่และกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P	32
ภาพที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการแทนที่และกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน G2P	33
ภาพที่ 2.15	อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน	35
ภาพที่ 2.16	อายุบ่มคอนกรีต 7 วัน	35
ภาพที่ 2.17	อายุบ่มคอนกรีต 14 วัน	36

ภาพที่ 2.18 อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน	36
ภาพที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	40
ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	41
ภาพที่ 3.3 การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์	46
ภาพที่ 3.4 วิธีการดำเนินงาน	48
ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเก้าปาล์มน้ำมันก่อนบด	50
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ่ายด้วยกล้อง SEM	51
ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเก้าปาล์มน้ำมันก่อนบดและหลังบด	51
ภาพที่ 4.4(ก) มอร์ตาร์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20	56
ภาพที่ 4.4(ข) มอร์ตาร์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30	56
ภาพที่ 4.4(ค) มอร์ตาร์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40	57
ภาพที่ 4.4(ง) มอร์ตาร์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50	57
ภาพที่ 4.4 การพัฒนากำล้างอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่มของมอร์ตาร์	57
ภาพที่ 4.5(ก) อายุบ่ม 3 วัน	61
ภาพที่ 4.5(ข) อายุบ่ม 7 วัน	61
ภาพที่ 4.5(ค) อายุบ่ม 14 วัน	62
ภาพที่ 4.5(ง) อายุบ่ม 28 วัน	62
ภาพที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำล้างอัดของมอร์ตาร์	62
ภาพที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำล้างอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม	63
ภาพที่ 4.7(ก) อายุบ่ม 3 วัน	64
ภาพที่ 4.7(ข) อายุบ่ม 7 วัน	65
ภาพที่ 4.7(ค) อายุบ่ม 14 วัน	65

ภาพที่ 4.7(ง) อายุบ่ม 28 วัน	66
ภาพที่ 4.7 ผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลั้งอัดของมอร์ต้าร์	66

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ วัสดุพอลิโซลันตามมาตรฐาน ASTM C618	5
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาล์ม	8
ตาราง 2.3 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	14
ตาราง 2.4 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5.....	15
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	16
ตารางที่ 2.6 สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน	16
ตารางที่ 2.7 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุ	26
ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบกำลังคอนกรีต	27
ตารางที่ 2.9 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ ปูนซีเมนต์และเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน	31
ตารางที่ 2.10 กำลังอัดและความต้องการน้ำของมอร์ต้า	31
ตารางที่ 2.11 แสดงความต้องการน้ำและความชื้นเหลือปกติของมอร์ต้า	34
ตารางที่ 2.12 ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุมที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน	37
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุม	42
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา	43
ตารางที่ 3.2 (ต่อ)ส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา.....	44
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน.....	52
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	53
ตารางที่ 4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์เทียบกับอายุ 3 วัน	55
ตารางที่ 4.4 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเก้าอี้ปาล์มน้ำมันและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา	60

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาของโครงการ ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตของโครงการและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการศึกษาโครงการนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน ในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันนี้ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม แยกเป็นทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยก่อนการนำกากปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล จะนำทะลายปาล์มและเปลือกปาล์มไปผ่านกระบวนการตีให้เป็นเส้นใย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น จากนั้นจึงนำเส้นใยและกะลาปาล์มไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ พบว่าในปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1,457,000 ไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปี ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิตปาล์มหรือ ประมาณ 2,147,000 ตันต่อปี สำหรับการปลูกปาล์มน้ำมันในภาคใต้ เริ่มเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2511 ในพื้นที่จังหวัดสตูลและจังหวัดกระบี่ การปลูกและอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันได้พัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องในปี พ.ศ. 2544 การปลูกปาล์มน้ำมันได้กระจายไปหลายจังหวัดในพื้นที่ภาคใต้ คาดว่ามีพื้นที่ปลูกกว่า 1.8 ล้านไร่โดยเป็นปาล์มที่ให้ผลผลิตแล้วประมาณ 1.3 ล้านไร่ คิดเป็นผลผลิตทะลายปาล์มสดประมาณ 3.7 ล้านตัน ส่งผลให้ภาคใต้จัดเป็นภาคที่ผลิตน้ำมันปาล์มมากที่สุด บริเวณพื้นที่ที่ปลูกมากที่สุดคือจังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูลและจังหวัดตรัง โดยจังหวัดกระบี่เป็นจังหวัดที่ปลูกมากที่สุดจำนวน 537,637 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39.40 และรองลงมาได้แก่ จังหวัดสุราษฎร์ธานีจำนวน 405,213 ไร่ และจังหวัดชุมพรจำนวน 216,798 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29.70 และ 15.89 ของพื้นที่ปลูกทั้งประเทศตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรเขต 8 จังหวัดสุราษฎร์ธานี) และหลังจากการเผาพบว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี ถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมี

การนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น นอกจากนี้ นโยบายของรัฐที่จะนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น เป็นไบโอดีเซล ซึ่งทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าจะใช้พื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันถึง 10 ล้านไร่จึงจะเพียงพอต่อการนำมาใช้ในไบโอดีเซลได้ ซึ่งหากโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนงานที่ตั้งไว้จะส่งผลให้เกิดแก๊สปาล์มน้ำมันจำนวนมากขึ้นกว่าปัจจุบันถึง 6 เท่าต่อปี และย่อมสร้างปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งให้มากยิ่งขึ้น การใช้แก๊สปาล์มน้ำมันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

Tangchirapat et al. (2009) พบว่าการใช้แก๊สปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดในคอนกรีตหลังแช่ในสารละลายซัลเฟตลดลง ตลอดจนการใช้แก๊สปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนแก๊สปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในคอนกรีตเนื่องจากไม่สามารถต้านทานการทำลายจากซัลเฟตได้และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำมาก ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่กำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมแก๊สปาล์มน้ำมันว่ามีค่ากำลังอัดสูงหรือต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เหมาะสมที่จะทำมอร์ต้าที่ผสมแก๊สปาล์มน้ำมันรับกำลังอัดสูงสุด

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณแก๊สปาล์มน้ำมันก่อนบดที่เหมาะสมที่จะทำมอร์ต้าได้รับกำลังอัดสูงสุด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

โครงการนี้มุ่งศึกษาผลการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมแก๊สปาล์มน้ำมันกับสารเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ และแทนที่แก๊สปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เท่ากับร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ใช้ทรายแห้งที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เป็นมวลรวม โดยใช้ อัตราส่วน ulla palm น้ำมัน : ทราย เท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก หล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 50x50x50 มม³ ทำการถอดแบบหลังหล่อตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงความเข้มข้นของค่าที่เหมาะสมที่จะทำให้มอร์ต้าร์ที่ผสม ulla palm น้ำมัน ให้ ได้รับกำลังอัดสูงสุด

1.4.2 ได้ทราบปริมาณ ulla palm น้ำมันก่อนบดที่เหมาะสมที่จะทำให้มอร์ต้าร์ได้รับกำลังอัด สูงสุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงเถ้าปาล์มน้ำมัน สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์มน้ำมัน วัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material)

คอนกรีตที่ขาดมวลรวมละเอียดจะทำให้เกิดการแยกตัวง่ายเป็นสาเหตุของการเอี่ยม จึงควรต้องมีมวลรวมละเอียดเพื่อลดการเอี่ยมและช่วยเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีต ซึ่งได้แก่วัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าแกลบหรือเถ้าลอย เป็นต้น

วัสดุปอซโซลาน คือวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินา มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่อุณหภูมิปกติร่วมกับความชื้นก่อให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก

การใช้สารปอซโซลานจะช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสดที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อยู่น้อยมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่าแต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน และยังช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อสารเคมีเพิ่มขึ้น เพราะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลง มาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของ

ปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหยาบ วัสดุปอซโซลานีมีอยู่ในเมืองไทยในปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น

มาตรฐาน ASTM C618 สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	วัสดุปอซโซลาน		
	N	F	C
ซิลิคอนไดออกไซด์ + อะลูมิเนียมออกไซด์ + เฟอริกออกไซด์ต่ำสุดร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ สูงสุดร้อยละ	4.0	5.0	5.0
อัลคาไลด์ สูงสุดร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ปริมาณความชื้น สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	6.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0
คุณสมบัติทางกายภาพ	N	F	C
ความละเอียด : ปริมาณค้ำตะแกรงเบอร์ 325 สูงสุดร้อยละ	34	34	34
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัว สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ความต้องการปริมาณน้ำ สูงสุดร้อยละ	115	105	105
ดัชนีกำลัง			
ที่อายุ 7 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75
ที่อายุ 28 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งจำแนกประเภทของวัสดุปอซโซลานออกเป็น 3 ชนิดซึ่งแสดงในตาราง

หมวด N ได้แก่ วัตถุประสงค์ หรือวัตถุประสงค์โซลันธรธรรมชาติ เช่น กล้วย (Rice huskash) หินเซอร์ท (Opaline Cherts) หินชั้น (Shale) ภูเขาไฟ เป็นต้น

หมวด F ได้แก่ กล้วยทั่วไปที่ได้จากการเผาถ่านหิน (Bituminous) และแอนทราไซด์ซึ่งหมวด F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ (Calcium oxide , CaO)

หมวด C ได้แก่ กล้วยทั่วไปที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) และ ซับบิทูมินัส หมวด C จะมี แคลเซียมออกไซด์สูง (Calcium oxide , CaO) และมีซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) กับ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ต่ำ

2.1.1 ปฏิกริยาปอซโซลานิก

กลไกการเกิดปฏิกริยาของวัตถุประสงค์โซลันในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต เป็นการเกิดปฏิกริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยาไฮเดรชัน กับซิลิกาหรืออลูมินาที่ได้จากวัตถุประสงค์โซลันได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือแคลเซียมอลูมินไฮเดรตที่ให้กำลังแก่มอร์ตาร์ได้ ปกติวัตถุประสงค์โซลันไม่มีสมบัติเป็นวัตถุประสงค์ประสานหรืออาจมีน้อย แต่สามารถให้สมบัติในการยึดประสานได้บ้างในวัตถุประสงค์โซลันที่มีองค์ประกอบแคลเซียมออกไซด์สูงขึ้น ลักษณะทางกายภาพที่ดีของวัตถุประสงค์โซลันคือมีความพรุนต่ำและอนุภาคกลมตัน เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ซึ่งทำให้เกิดปฏิกริยาปอซโซลานที่ให้กำลังอัดกับมอร์ตาร์สมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้วัตถุประสงค์โซลันที่มีปริมาณของซิลิกาหรืออลูมินาสูง สามารถเกิดปฏิกริยากับต่างในมอร์ตาร์ได้สมบูรณ์ ทำให้มีกำลังอัดสูงขึ้นได้ ซึ่งการเกิดปฏิกริยาปอซโซลานที่กล่าวมาพบว่าหากสามารถเร่งปฏิกริยาระหว่างซิลิกาหรืออลูมินากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้เกิดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น โดยการชะเอาซิลิกาหรืออลูมินาออกจากวัตถุประสงค์โซลันก่อน เพื่อให้พร้อมที่จะเข้าทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นอีกแนวทางที่จะปรับปรุงสมบัติของวัตถุประสงค์โซลันให้สามารถใช้งานให้ดีขึ้นโดยไม่ต้องบดเนื่องจากการบดใช้พลังงานและงบประมาณสูงขึ้น

ในกรณีที่วัตถุประสงค์โซลันมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ปฏิกริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกริยาปอซโซลานสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



2.2 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) ในที่นี้หมายถึงเถ้าที่ได้จากการเผาของผลปาล์ม น้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และ ทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเฉพาะประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันเป็นอุตสาหกรรม เช่น ประเทศมาเลเซีย ประเทศอินโดนีเซีย และ ประเทศไทย (มีปริมาณการผลิตเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจากมาเลเซียและอินโดนีเซีย) เพราะต้นปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตในประเทศเหล่านี้ที่เป็นเขตร้อนชื้น ดังนั้นข้อมูลในเรื่องการใช้เถ้าปาล์มในงานคอนกรีตจึงแทบไม่สามารถหาได้จากนักวิจัยที่อาศัยอยู่ในทวีปยุโรปหรือสหรัฐอเมริกา เพราะไม่ใช่ปัญหาของประเทศเหล่านั้น ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเถ้าปาล์มน้ำมันจึงเป็นหน้าที่ของประเทศที่ผลิตน้ำมันปาล์มทั้งสิ้น ปีพ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1.45 ล้านไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4.08 ล้านตันต่อปี ทำให้เกิดกากของผลปาล์มน้ำมันประมาณ 2.14 ล้านตันต่อปี หลังจากการเผาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี ผ่านไปประมาณ 10 ปีในคือในพ.ศ. 2556-2557 พบว่าพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยเพิ่มขึ้นเป็นกว่า 4.4 ล้านไร่ มีผลผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าเป็น 12.37 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.), 2555) และกลายเป็นผู้ผลิตใหญ่อันดับที่ 3 ของโลกและมีเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น ประมาณ 300,000 ตันต่อปี แต่ที่สำคัญคือมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์น้อยมาก

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน

องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน พบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับเก้าอี้เคลือบและเก้าอี้เคลือบเปลือกไม้ แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือประมาณร้อยละ 60-70 มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 70 มีปริมาณ SO_3 ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณ LOI ที่สูงนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่สั้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุพอลิไซลาลาน Class N ได้ แม้ว่าเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันจะถือได้ว่าเป็นวัสดุพอลิไซลาลานสังเคราะห์ (เพราะได้จากการเผากากของผลปาเลียมน้ำมัน) ซึ่งแตกต่างจาก ASTM C618 ที่ระบุว่าวัสดุพอลิไซลาลาน Class N เป็นวัสดุพอลิไซลาลานจากธรรมชาติ

องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันจาก 2 แหล่งผลิตในประเทศไทย มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก และในแต่ละแหล่งจะมี LOI ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง คือประมาณร้อยละ 10 ซึ่ง LOI ที่อยู่ในเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่ติดน้ำมัน ทำให้ต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์มากขึ้น และหาก LOI มากๆ (มากกว่าร้อยละ 20) จะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเก้าอี้ปาเลียมน้ำมันมีการรับกำลังต่ำลงได้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล , วารสารคอนกรีตฉบับที่ 9 ประจำเดือนเมษายน 2553)

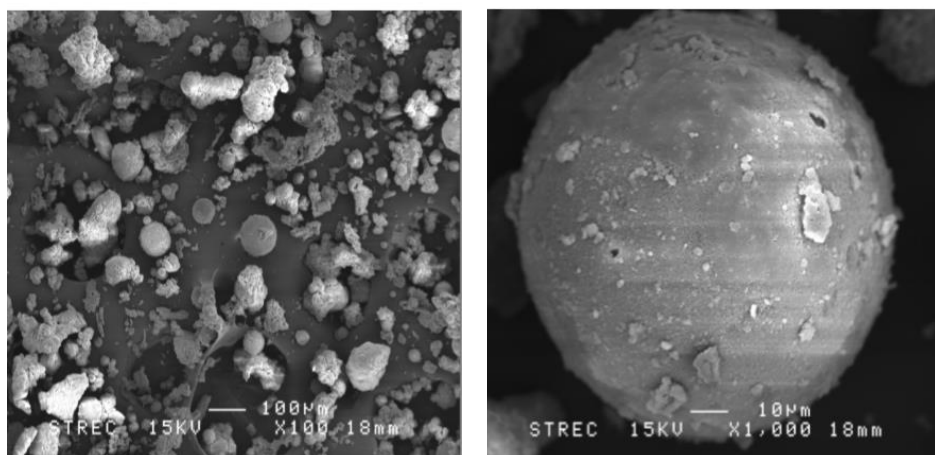
ออกไซด์	ร้อยละ โดยน้ำหนัก (%)				
	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เก้าอี้ถ่านหินแม่เมาะ	เก้าอี้ปาเลียมน้ำมัน	ซิลิกาฟุ้ง	เก้าอี้เคลือบ
SiO_2	20	48	65	92	90
Al_2O_3	5	26	3	0.7	0.5
Fe_2O_3	3	10	2	1.2	2.0
CaO	60	5	6	0.2	0.5
MgO	1.1	2	3	0.2	0.2
SO_3	2.4	0.7	0.4	-	1.5
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	7	2.6	-
LOI	2	3	10	-	4.7

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความละเอียดต่ำและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่มาก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย การบดจึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมัน การบดไม่เพียงเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ยังเป็นการลดความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมันด้วย ซึ่งสังเกตได้จากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากคือจาก 1.97 เป็น 2.33 เมื่อน้ำหนักของวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ลดลงจากร้อยละ 41.2 เหลือร้อยละ 1.5

ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด

ลักษณะทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน สำหรับภาพถ่ายขยายทางกายภาพของ เถ้ากะลาปาล์มน้ำมันที่ได้จากการถ่ายแบบ SEM โดยมี กำลังขยายที่ 100 เท่า และ 1,000 เท่า ผลการวิเคราะห์และการทดสอบเถ้ากะลาปาล์มน้ำมันจาก ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) โดยห้องปฏิบัติการเครื่องมือทดสอบทั่วไป ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จาก Figure 1 อนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นก้อนซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน ก้อนมนๆ เป็นเหลี่ยม และมีรูพรุน เมื่อทำการขยายที่ 1,000 เท่า พบว่าเถ้าปาล์มในหลายอนุภาคนั้นมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ผิวรอบๆ ขรุขระและมีรูพรุน เป็นผลึกที่ค่อนข้างหายาบ ๆ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเอ้าปาล์มน้ำมันขนาดเล็กโดยเครื่องทดสอบ SEM

2.2.3 ผลกระทบของเอ้าปาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตสด

เอ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีความพรุนน้อยกว่าเอ้ากลบบดละเอียดที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นการใช้เอ้าปาล์มน้ำมันในการแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ทำให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเปลี่ยนแปลง หรืออาจเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม หรือในกรณีของการใช้เอ้ากลบบดละเอียดที่มีความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่เพิ่มมากกว่า อย่างไรก็ตาม การใช้เอ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรง (ไม่มีการบดให้ละเอียดขึ้น) ในการผสมคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมเนื่องจากการดูดน้ำของเอ้าปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้การใช้เอ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงทำให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้เอ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นเช่นเดียวกับกรณีของการใช้วัสดุปอซโซลานทั่วไป คือทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเอ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดยาวนานกว่ากรณีของคอนกรีตที่ไม่มีเอ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 15-20 นาที เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10-20 และระยะเวลาการก่อตัวจะนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเอ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 40-60 นาที เมื่อใช้เอ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30/40

2.2.4 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1990 โดย Tay ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำและคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ ต่อมาในปี ค.ศ.1996 Hussin และ Awai นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10-60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ และกำลังอัดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้

การศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันในประเทศไทย (วีรชาติ และคณะ) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ ส่วนการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด มีปริมาณข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับ

การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคประมาณ 7.3 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 สามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยที่การแทนที่ร้อยละ 30 ยังสามารถให้กำลังอัดได้ถึงร้อยละ 99 ที่อายุ 90 วัน เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติทางปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูงขึ้น

เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนมีความละเอียดยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 และคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ด้วย โดยมีกำลังอัดสูงถึง 88-91 เมกะปาสกาลเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 10.1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ

10-30 ความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่ำกว่าแท่งคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม และมีการขยายตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 และ 20 ยังมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตลดลง และมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2.2.5 ข้อเสนอแนะในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีต

ในปัจจุบันประเทศไทยไม่มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานสำหรับกำหนดคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดใหม่ และมีการวิจัยที่ยังไม่แพร่หลายการวิจัยเกี่ยวเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการวิจัยเถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบหรือซิลิกาฟูม ดังนั้นการพัฒนาหรือศึกษาจะต้องทำอีกมาก อย่างไรก็ตามมาตรฐานของ ASTM C618 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับกำหนดคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน อาจนำมาใช้ในการพิจารณาได้โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติที่กำหนดใน class N ได้แก่ มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ 10 มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 เป็นต้น นอกจากนี้ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันก็เป็นปัจจัยหลักที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย รวมถึงความต้องการน้ำของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เพราะอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) จะส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต

2.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และกรรมวิธีการผลิต สารประกอบของวัสดุจะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาการปรับ ส่วนประกอบทางเคมีจะให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติต่างกัน เมื่อผสมกับน้ำปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยา

และ เกิดการก่อตัวและแข็งตัว การผสมเถ้าถ่านหินจะทำให้ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เปลี่ยนแปลง

2.3.1 ชนิดของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน ASTM C150 และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย มอก. 15 แบ่งปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ คือ

- 1) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) ใช้สำหรับลักษณะงานธรรมดาที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว
- 2) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland cement) ใช้สำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการลดอุณหภูมิเนื่องจากสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูง งานคอนกรีตเหลาหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้าง เขื่อนคอนกรีต กำแพงดินหนา ๆ หรือท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ๆ ต่อม่อ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร
- 3) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความแข็งแรงสูงโดยเร็ว (High early strength Portland cement) ปูนซีเมนต์ให้กำลังสูงในระยะแรกมีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดามีประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่จะต้องใช้งานเร็วหรือรีบแบบได้เร็ว เช่น เสาค้ำคอนกรีต ถนน พื้น และคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนประเภทนี้ ได้แก่ ปูนตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง และตราสามเพชร
- 4) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดเกิดความร้อนต่ำ (Low heat Portland cement) สามารถลดปริมาณความร้อนเนื่องจากการรวมตัวของปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งจะสามารถลดการขยายตัวและหดตัวของคอนกรีตภายหลังการแข็งตัว ใช้มากในการสร้างเขื่อน เนื่องจากอุณหภูมิ ของคอนกรีตต่ำกว่างานชนิดอื่น ไม่เหมาะสำหรับโครงสร้างทั่วไปเพราะแข็งตัวช้า
- 5) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Sulphate resistance Portland cement) ชนิดทนซัลเฟตได้สูงใช้ในบริเวณที่น้ำหรือดินมีค่าต่างสูงมีระยะการแข็งตัวช้า และมีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม วัสดุชนิดนี้พบครั้งแรกที่เมืองพอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษปูนซีเมนต์แลนต์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโคโลไมต์ ($MgCo_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาในที่ใช้งานทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุ

แคลเซียมซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมี และรวมตัวกันเป็น สารประกอบอยู่ในปูนเม็ดโดยจะเกิดเป็น สารประกอบหลักสำคัญ 4 ชนิด เช่น ไตรแคลเซียมซิลิเกต, ไดแคลเซียมซิลิเกต, ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต, เตตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ จะอยู่ในรูปของผลึก ที่ละเอียดมาก โดยมีส่วนประกอบทางเคมีและชื่อย่อ ดังตารางที่ 2.3

ตาราง 2.3 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัว และแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ สารประกอบและคุณสมบัติบางประการ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5
(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

สารประกอบและคุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C ₃ S	49	46	56	25	30
C ₂ S	25	29	15	50	46
C ₃ A	12	6	12	5	5
C ₄ AF	8	12	8	12	13
ความละเอียด (เบลน, ซม. ² /กรัม)	3,000	3,000	4,500	3,000	3,000
กำลังอัด (3 วัน, กก./ซม. ²)	180	150	310	80	120
ความร้อนปฏิกิริยา (28 วัน, จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

2.3.2 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก (major oxides) และออกไซด์รอง (minor oxides) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หนักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (minor oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลตาไล (Na₂O และ K₂O) และสารซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) แลฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P₂O₅) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ การเผาและการเย็นลงของปูนเม็ด ขนาดและรูปร่างของสารประกอบสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาส่องดูได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	
	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ค่าเฉลี่ย
Calcium Oxide (CaO)	60 - 70	64.4
Silicon Dioxide (SiO ₂)	17 - 25	20.0
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	3 - 8	5.8
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.5 - 6.0	3.2
Magnesium Oxide (MgO)	0.1 - 4.0	0.5
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.1 - 1.3	0.5
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.1 - 1.3	0.5
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.5 - 3	2.6
สารประกอบอื่น	1 - 3	1.0
Loss On Ignition (LOI)	0.1 - 3.0	1.0
Insoluble Residue	0.2 - 0.8	0.5

C₃S, C₂S, C₃A และ C₄AF มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ C₃S มีอยู่มากที่สุด มีรูปร่างเหลี่ยมสี่เท่าแก่เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) และเกิดความร้อนเรียกว่าความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเกิดการก่อตัวและแข็งตัว C₃S ให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2.6

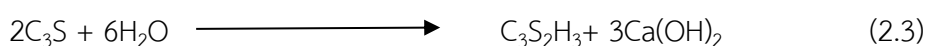
ตารางที่ 2.6 สารประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน

ชื่อสารประกอบทางเคมี	สูตรเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C ₃ S)	3CaO-SiO ₂	45 - 55
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C ₂ S)	2CaO-SiO ₂	15 - 35
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C ₃ A)	3CaO-Al ₂ O ₃	7 - 15
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C ₄ AF)	4CaO-Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	5 - 10

2.3.3 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

สารซีเมนต์ที่ใช้ในยุคแรกเป็นซีเมนต์ที่ไม่แข็งตัวในน้ำได้มาจากยิปซัม หรือปูนขาว ชาวอียิปต์โบราณใช้มอร์ตาร์ (Mortar) ทำจากยิปซัมที่ผ่านการเผาในงานก่อสร้างต่าง ๆ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ชนิดหนึ่ง (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) ซึ่งได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) กับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เมื่อผสมกับน้ำสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกริยากับน้ำ เรียกว่า ปฏิกริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวในน้ำ ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์มีหลายชนิดสารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ปฏิกริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำมีรายละเอียดดังสมการที่ 2.3 ,2.4 ,2.5 และ 2.6

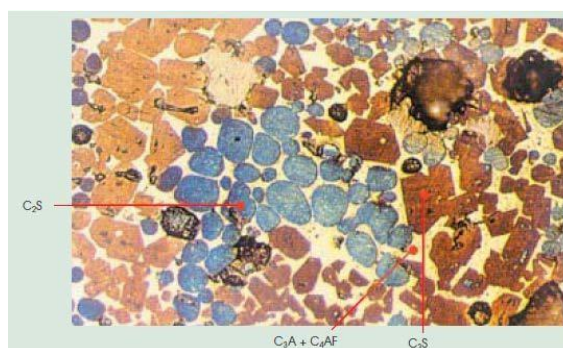
ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)



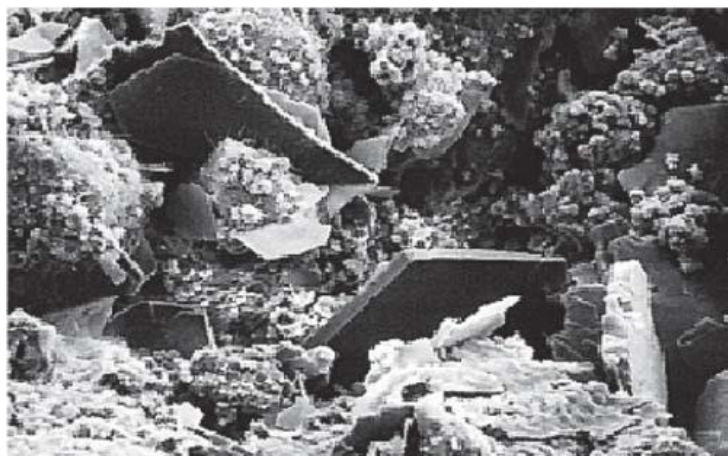
ปฏิกริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)



ในทันทีที่เกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จะมีลักษณะเป็นวุ้น ยังไม่แข็งตัวแต่จะค่อยๆ แข็งตัว และมีการพัฒนากำลังเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น องค์ประกอบด้วยรวมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ผลึก C_3S ในเม็ดปูนซีเมนต์โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope ขยาย 3,000 เท่า ดังภาพที่ 2.4

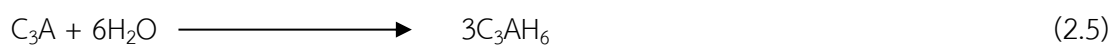


ภาพที่ 2.2 แคลเซียมซิลิเกต C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF (Shetty M.S., 1982)

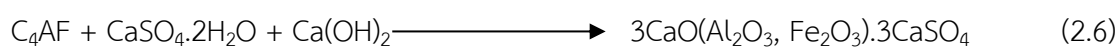


ภาพที่ 2.3 ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

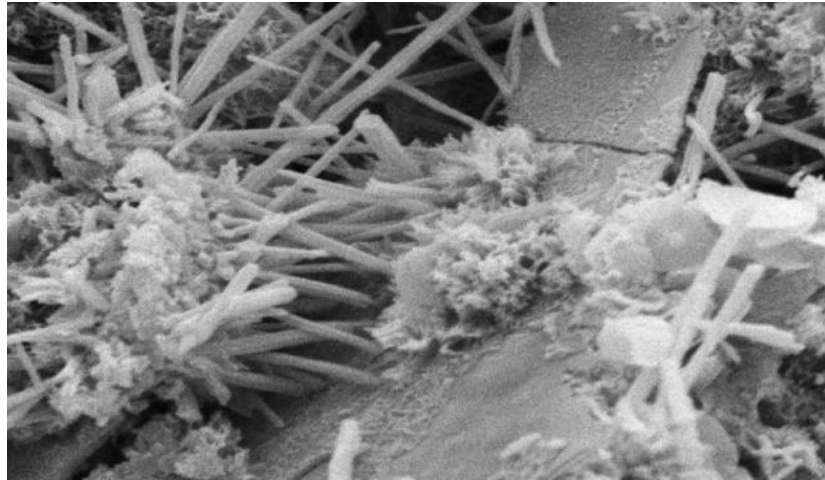
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

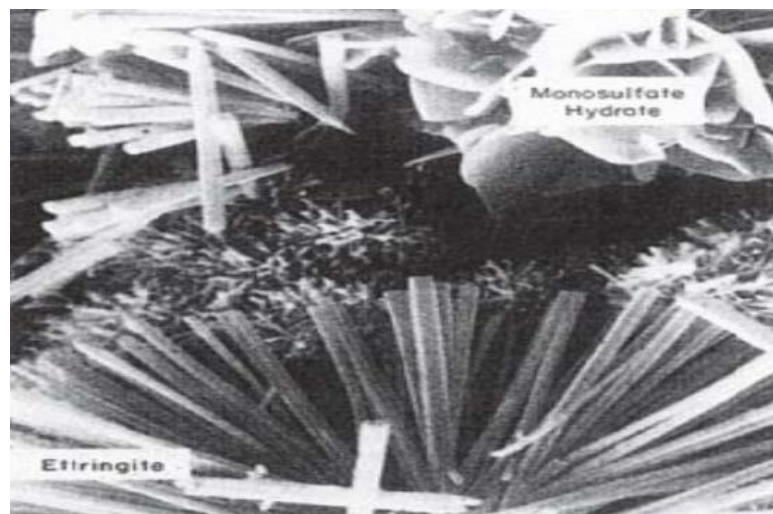


ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไปเพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตไม่ให้เกิดเร็วเกินไป เพราะเมื่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนตทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟตจะได้แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไกต์ (Ettringite) ดังภาพที่ 2.5 ทำให้ปฏิกิริยาเกิดยากขึ้น



ภาพที่ 2.4 แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไกต์(ปริญญา จินดาประเสริฐ,2547)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์(C_4AF) นี้จะเกิดในช่วงต้นโดย เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์จะทำปฏิกิริยากับบิซซิม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคเหมือนเข็มของเอททริงไกต์(Ettringite) ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 เอททริงไกต์ และ Monosulfate

2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟ เป็นของแข็งลักษณะผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย ไม่ติดไฟ น้ำหนักโมเลกุล 40.01 เป็นต่างแก่ จุดหลอมเหลว 318 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 2.13 ละลายน้ำได้ดีและเกิดความร้อนสูง และมีควันหรือละอองสาร เมื่อถูกความชื้นจะเยิ้มได้ง่าย สารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมักอยู่ในรูปของแข็งเป็นเม็ด (pellets) ทางอุตสาหกรรมอาจอยู่ในรูปของเหลวละลายน้ำชนิดเข้มข้น เป็นแผ่นหรือเป็นแท่ง ทำปฏิกิริยากับกรดได้เกลือของสาร และทำปฏิกิริยากับกรดไขมันได้สบู่ นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้ง่ายเกิดโซเดียมคาร์บอเนต

สารนี้ได้จากการผ่านกระแสไฟฟ้าในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งโซเดียมไอออนจะไปที่ขั้วบวก (Cathode) ซึ่งมีแผ่นแอสเบสตอสป้องกันคลอรีน แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนได้ โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ในอุตสาหกรรมผ้า พลาสติก สีย้อม ฟอกย้อม แร่ โลหะ ทำแม่พิมพ์ เป็นสารเคมีสำคัญ สำหรับผลิตสบู่ กระจก ยาสีฟัน และใช้ในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนให้บำบัดน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดเพื่อให้เป็นกลาง และการล้างพื้นผิวต่างๆให้สะอาดโดยเฉพาะการล้างไขมันออก

โซดาไฟก้อน เป็นสถานะปกติของโซดาไฟที่อยู่ในรูปของแข็ง มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีขาว มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะให้ฤทธิ์เป็นด่าง ใช้มากในภาคอุตสาหกรรม และมีการเกษตร

โซดาไฟเหลว เป็นผลิตภัณฑ์ของโซดาไฟที่อยู่ในรูปของเหลวที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย (น้ำ) มีฤทธิ์เป็นด่าง ไม่มีกลิ่น แต่สามารถเกิดไอระเหยได้ เมื่อสัมผัสจะสั่นเหมือนสบู่ พบจำหน่ายมากในปัจจุบัน ได้แก่ โซดาไฟ 32% และ 50% เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้มากในภาคอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.6 โซดาไฟก้อน

2.4.1 ลักษณะเฉพาะของโซดาไฟ

- 1). เป็นก้อนผลึกหรือผงสีขาว
- 2). ละลายน้ำได้ต่างแก้ว
- 3). มวลอะตอมเท่ากับ 39.9971 กรัม/โมล
- 4). ความหนาแน่น 2.1 กรัม/ลบ.ซม.
- 5). จุดหลอมเหลวที่ 318 องศาเซลเซียส
- 6). จุดเดือดที่ 1390 องศาเซลเซียส
- 7). ความสามารถในการละลายน้ำ 111 กรัม/100 มล. ที่ 20 องศาเซลเซียส

2.4.2 การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์

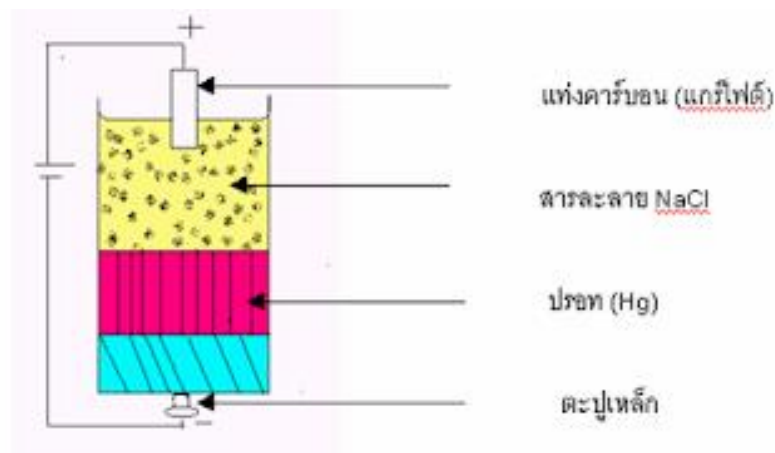
การผลิต NaOH ในอุตสาหกรรมสามารถผลิตได้หลายวิธี คือ

1. การผลิตโดยใช้เซลล์ไดอะแฟรม

เซลล์ไดอะแฟรม เป็นเซลล์ที่มีแผ่นแอสเบสตอสกั้นระหว่างแอโนดกับแคโทด แอโนดจะทำด้วยไทเทเนียม แคโทดจะทำด้วยเหล็กกล้า ปฏิกิริยาที่เกิดในเซลล์ที่แอโนด $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ ที่แคโทด $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ แผ่นไดอะแฟรมยอมให้อิออนผ่านไปได้แต่ไม่ยอมให้ก๊าซ H_2 และ Cl_2

ผ่านและมีการปรับ ความดันด้านแอโนดให้สูงกว่าแคโทด ไอออนทางด้านแอโนดจึงไหลผ่านไปทางด้านแคโทดเสมอ OH-ที่แคโทดจึงไม่ไหลไปที่แอโนดจึงได้ NaOH ที่แคโทด Na+ และ Cl- ที่เกิดปฏิกิริยาไม่หมดจะผ่านแผ่น ไดอะแฟรมไปอยู่ที่แคโทดด้วย จะได้ NaOH ที่ไม่บริสุทธิ์ คือมี NaOH 10% แต่มี NaCl 15 % จึงแยก NaCl ออกโดยการนำไปประเหยน้ำ เพื่อให้ NaCl ตกผลึก จะได้สารละลาย NaOH 50% และมี NaCl 1% ซึ่ง สามารถ นำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมได้

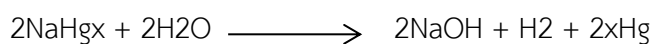
2.การผลิตโดยใช้เซลล์ปรอท



ภาพที่ 2.7 การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้เซลล์ปรอท

เซลล์ปรอทเป็นเซลล์ที่ใช้ไทเทเนียมเคลือบเป็นแอโนดและใช้ปรอทเป็นแคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดในเซลล์อิเล็กโทรไลต์อย่างง่าย (เซลล์ปรอท) ในการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่แอโนด $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ ที่แคโทด Na^+ จะรับอิเล็กตรอนเกิดเป็น Na เข้าร่วมกับปรอทเกิดเป็นโซเดียมอะมัลกัม

$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NaHg}_x$ จากนั้นแยก NaOH ออกจาก Hg โดยผ่านน้ำบริสุทธิ์เข้าไป Na จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น NaOH ดังสมการ



การผลิต NaOH วิธีนี้จะได้ NaOH เข้มข้น 50 % และ Hg หลังจากแยก NaOH ออกแล้วสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ในการผลิต NaOH นี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คือจะมี HgCl_2 ปนออกมากับน้ำทิ้ง จุลินทรีย์จะเปลี่ยน HgCl_2 ให้เป็นสารอินทรีย์ของปรอทเช่น $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ สารปรอทจะเข้าไปสะสมอยู่ในสัตว์น้ำและถ่ายทอดมาสู่คนทำให้เป็นโรคพิษปรอทได้

3.การผลิตโดยใช้เซลล์เยื่อแลกเปลี่ยนไอออน

เซลล์เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนคล้ายกับเซลล์ไดอะแฟรมต่างกันที่ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนแทน ไดอะแฟรมโดยเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนจะยอมให้เฉพาะไอออนบวกผ่านเท่านั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ที่แอโนด $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ ที่แคโทด $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$ จะรวมกับ Na^+ เกิดเป็น NaOH การผลิต NaOH โดยวิธีนี้จะได้ความเข้มข้นประมาณ 30-35%

2.4.3 ประโยชน์โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซดาไฟสามารถใช้ในรูปของโซดาไฟก้อน และโซดาไฟเหลว ในด้านต่างๆ คือ

- เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโซดาไฟเหลว
- ใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตสบู่ ด้วยการทำปฏิกิริยากับไขมันเปลี่ยนเป็นสบู่
- ใช้สำหรับขจัดคราบสกปรก และสิ่งอุดตันในท่อระบายน้ำ ด้วยก้อนหรือละลายน้ำเทราดบริเวณที่มีการอุดตันของท่อ
- ใช้สำหรับปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำให้เป็นด่าง โดยเฉพาะในระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำ
- ใช้สำหรับการตกตะกอนของแร่ธาตุหรือโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
- ใช้ฟื้นฟูสภาพของเรซินของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ
- ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมไหม โดยเฉพาะขั้นตอนการลอกกาไหมที่ต้องต้มละลายกาไหมด้วยโซดาไฟ สำหรับการฟอกไหมในระดับครัวเรือน ชาวบ้านเรียกโซดาไฟว่า ผงมัน ซึ่งหาซื้อได้ตามร้านขายเคมีฟอกไหม

ตัวอย่างประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม

1. อุตสาหกรรมสิ่งทอ มักใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการปรับสภาพเส้นใยที่อุณหภูมิ 15-25 องศาเซลเซียส นาน 25-40 นาที ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 20-25% ซึ่งจะทำให้เกิดการคลายตัวของเส้นใยเซลลูโลสทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อม เพิ่มความมันวาว และอ่อนนุ่มขณะซักทอ

2. อุตสาหกรรมกระดาษ มักใช้สำหรับการฟอกขาวเยื่อกระดาษร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะไม่ทำลายสภาพเส้นใยเยื่อกระดาษ

3. อุตสาหกรรมอาหาร มีการใช้ในหลายรูปแบบ ได้แก่

- การล้างทำความสะอาดขวดหรือภาชนะบรรจุภัณฑ์
- การแปรรูปผลิตภัณฑ์แป้ง เพื่อย่อยสลายแป้งให้เป็นน้ำตาล
- ใช้ในกระบวนการผลิตผงชูรสหรือโมโนโซเดียมกลูตาเมต

4. อุตสาหกรรมสบู่ และผงซักฟอก โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพกรดไขมันให้เป็นกลาง

2.4.4 อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อรุนแรง โดยทำปฏิกิริยากับโปรตีนและไขมัน ทำให้บริเวณนั้นอ่อนนุ่มกลายเป็นวุ้นหรือเจลาตินและสบู่ เนื้อเยื่อถูกทำลายหรือถูกกัดลึกลงไป ซึ่งการทำลายอาจต่อเนื่องหลายวัน ล้างน้ำออกได้ยาก

การหายใจเอาไอหรือละอองสารทำให้ระคายเคืองต่อทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้จาม ปวดคอ น้ำมูกไหล ปอดอักเสบรุนแรง หายใจขัด การสัมผัสผิวหนังจะระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้และพุพองได้ การกลืนกินทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ กระเพาะอาหาร เกิดแผลและเลือดออกในกระเพาะอาหาร อาเจียน ท้องร่วง เสียชีวิตได้ หากสัมผัสถูกตาจะมีฤทธิ์กัดกร่อน ระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้ อาจทำให้มองไม่เห็นจนถึงขั้นตาบอดได้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ไวไฟ และต้องหลีกเลี่ยงความชื้น ฝุ่น น้ำกรด ของเหลวไวไฟ ไตรคลอโรเอทิลีน ซึ่งอาจเกิดไฟไหม้หรือระเบิดได้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัด การซึมของน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต (วชิรกรณ์ เสนาวัง, 2554)

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีกำลังอัด อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 1.7 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+เถ้าปาล์มน้ำมัน) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 0.45 และ 0.50 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ระหว่าง 5-10 ซม. จากนั้นทดสอบกำลังอัด การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีการแรงด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C 1202 และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ตามมาตรฐาน AASHTO TP 64

ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นส่วนผสม สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น และมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม โดยเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าคอนกรีตมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 ทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุมตั้งแต่อายุ 28 วัน และทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง โดยมีค่าเท่ากับ 2.80×10^{-13} 2.13×10^{-13} และ 1.08×10^{-13} เมตร/วินาที ที่อายุ 28 60 และ 90 วัน หรือมีค่าเป็น 0.93 0.80 และ 0.53 เท่า ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 35 มีความต้านทานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ที่อ่อนสูงชันอย่างมาก โดยมีค่าเพียงร้อยละ 31 29 และ 31 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 26 60 และ 90 วัน ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ คิดเป็น 0.32 0.33 และ 0.21 เท่าของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

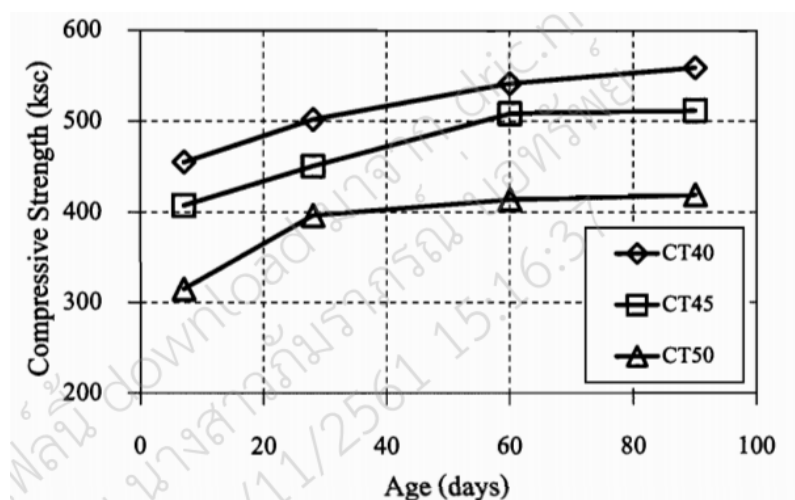
ตารางที่ 2.7 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325 (%)	Median Particle Size, d_{50} (microns)
Original Palm Oil Fuel Ash	1.97	41.2	65.5
Ground Palm Oil Fuel Ash	2.52	1.7	10.7
Cement Type I	3.25	-	14.7

กำลังอัดของคอนกรีต

1. กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม

เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน พบว่าที่อายุ 28 วันกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT40 มีค่าเท่ากับ 502 กก/ซม² และเพิ่มขึ้นเป็น 559 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ส่วนคอนกรีตควบคุม CT45 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 451 กก/ซม² และเพิ่มขึ้นเป็น 512 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ขณะที่คอนกรีตควบคุม CT50 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 396 กก/ซม² และเพิ่มขึ้นเป็น 419 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน โดยคอนกรีตมีการพัฒนา กำลังอัดอย่างต่อเนื่อง และกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต (W/B) ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Abrams (1918)



ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตควบคุม

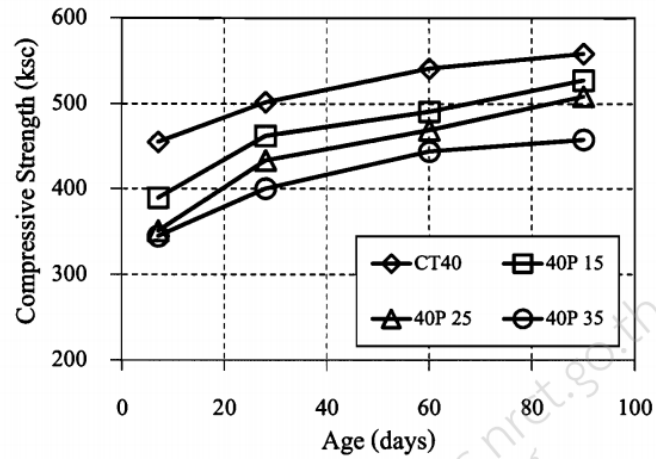
2. กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 2.8 แสดงกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด โดยแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่ากับ 475 กก/ม^3 , 425 กก/ม^3 และ 385 กก/ม^3 โดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 3 ค่า คือ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 5 ถึง 10 ซม.

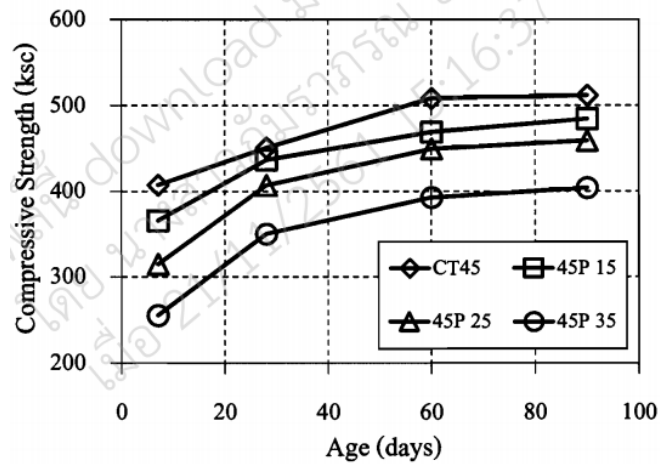
ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบกำลังคอนกรีต

Sample	Compressive Strength (ksc)-Normalized Compressive Strength (%)			
	7 days	28 days	60 days	90 days
CT40	455-(100)	502-(100)	541-(100)	559-(100)
40P15	389-(86)	462-(92)	491-(91)	528-(94)
40P25	351-(77)	433-(86)	469-(87)	509-(91)
40P35	345-(76)	400-(80)	444-(82)	458-(82)
CT45	407-(100)	451-(100)	508-(100)	512-(100)
45P15	366-(90)	443-(98)	467-(92)	485-(95)
45P25	315-(77)	407-(90)	462-(90)	459-(90)
45P35	255-(63)	350-(78)	393-(77)	428-(84)
CT50	315-(100)	396-(100)	414-(100)	419-(100)
50P15	288-(91)	364-(92)	377-(91)	395-(94)
50P25	285-(90)	346-(88)	353-(85)	355-(85)
50P35	256-(81)	317-(80)	327-(79)	339-(81)

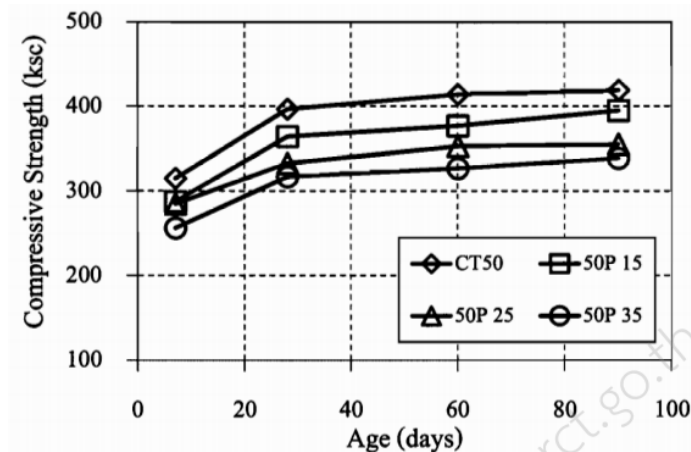
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในคอนกรีต พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดทุกอัตราส่วนการแทนที่ และทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีการพัฒนากำลังอัดที่ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่และอัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานเท่ากับ 0.40



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานเท่ากับ 0.45



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานเท่ากับ 0.50

เห็นได้ว่าตลอดอายุการทดสอบจนถึง 90 วัน คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วน
ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม และมี
แนวโน้มเป็นนี้ตลอดไปเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย
ของฉิริสิทธิ์ แซ่ตั้ง และคณะ (2547) ที่พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้
และมีกำลังอัดที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูง

2.5.2 การศึกษากำล้างอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำล้างอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดจนมีอนุภาคค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 17.1 (ละเอียดปานกลาง) และร้อยละ 1.5 (ละเอียดมาก) โดยน้ำหนัก รวมกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้บดเป็น 3 ขนาด จากนั้นนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทดสอบกำล้างอัดของมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม. ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน และทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม. ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ผลการวิจัยพบว่ากำล้างอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีกำล้างอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกอายุการทดสอบ ละมีค่าลดลงมากมเอการแทนที่เพิ่มขึ้นจึงไม่เหมาะนำมาเป็นวัสดุปอซโซลาน ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการบดพบว่ามอร์ตาร์มีกำล้างอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมาก การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลางและขนาดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ สามารถให้กำล้างอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลางและขนาดละเอียดมากทุกอัตราการแทนที่มีการขยายตัวที่อายุ 364 วันต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และการแทนที่ร้อยละ 30 มีค่าการขยายตัวต่ำสุด

ตารางที่ 2.9 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325 (%)	Blaine Fineness (cm ² /g)	Median Particle Size (micron)
Cement I	3.14	N/A	3,630	14.6
Cement V	3.17	N/A	4,440	7.5
OP	1.97	41.2	N/A	62.5
G1P	2.17	17.1	6,990	19.9
G2P	2.33	1.5	12,220	10.1

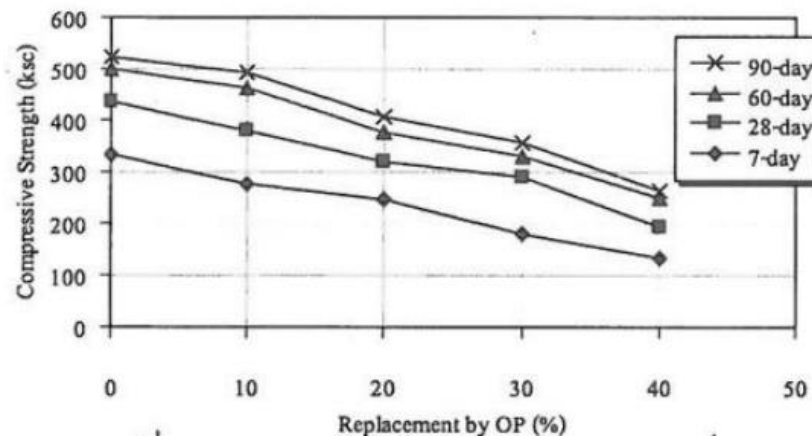
N/A = Not Applied

ตารางที่ 2.10 กำลังอัดและความต้องการน้ำของมอร์ต้า

Mixes	W/B	Flow	Water Requirement (%)	Compressive Strength (ksc) – Normalized Compressive Strength (%)			
				7 days	28 days	60 days	90 days
CT1	0.67	111	100	333 – 100	436 – 100	499 – 100	525 – 100
CT5	0.67	108	100	286 – 86	441 – 101	504 – 101	542 – 103
OP10	0.68	105	101	276 – 83	381 – 87	462 – 93	494 – 94
OP20	0.70	109	104	248 – 74	319 – 73	375 – 75	406 – 77
OP30	0.72	107	107	179 – 54	289 – 66	331 – 66	357 – 68
OP40	0.73	108	109	133 – 40	193 – 44	250 – 50	264 – 50
G1P10	0.66	107	99	318 – 96	411 – 94	498 – 100	535 – 102
G1P20	0.67	111	100	298 – 90	389 – 89	473 – 95	510 – 97
G1P30	0.68	112	101	258 – 78	361 – 83	443 – 89	473 – 90
G1P40	0.69	107	103	217 – 65	309 – 71	366 – 73	392 – 75
G2P10	0.66	107	99	325 – 98	428 – 98	510 – 102	546 – 104
G2P20	0.67	111	100	301 – 90	414 – 95	498 – 100	532 – 101
G2P30	0.67	106	100	283 – 85	394 – 90	469 – 94	501 – 95
G2P40	0.68	109	101	260 – 78	344 – 79	409 – 82	437 – 83

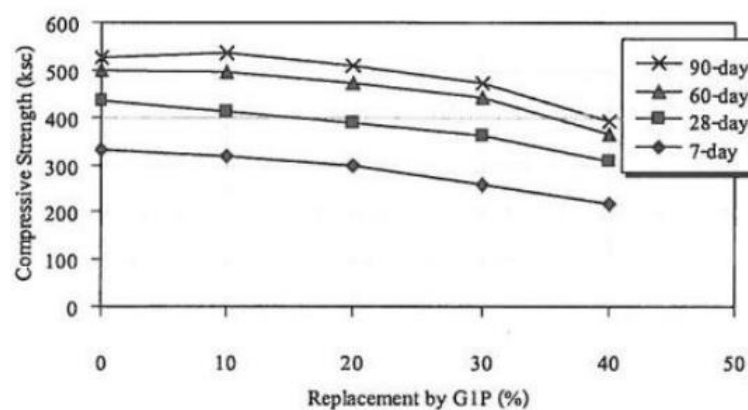
หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงมอร์ต้าที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีกำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่ามอร์ต้ามาตรฐาน CT1

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการแทนที่ของมอร์ต้าที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) ทุกอัตรา การแทนที่มีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐาน CT1 ที่เป็นเช่นนี้เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดส่วนมากอนุภาคมีโพรงอากาศ ความพรุนสูง และขนาดใหญ่จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานน้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ จึงทำให้กำลังอัดลดลง

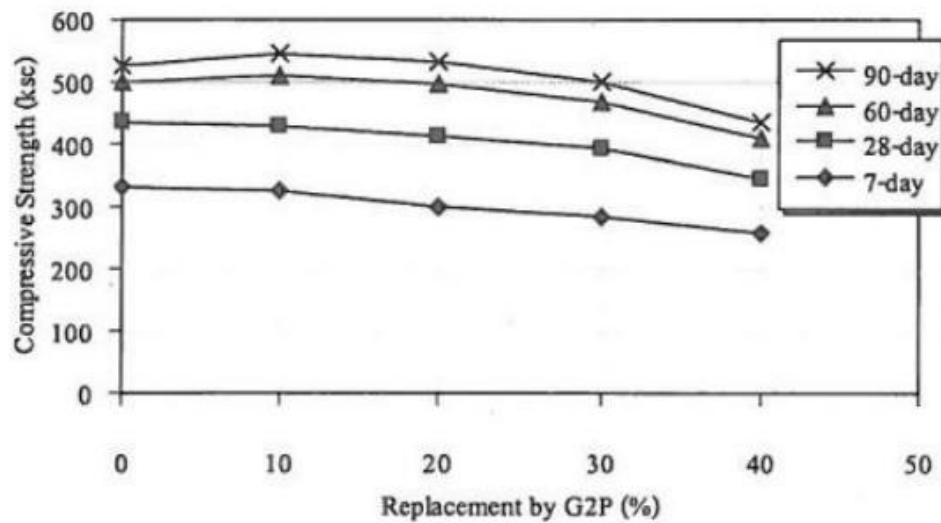


ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการแทนที่ละก้างอัดมอร์ตาร์ทที่ผสม
 เถ้าปาล์มน้ำมัน OP

ภาพที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำล้งอัดและอัตราการแทนที่ของมอร์ตาร์ทผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P พบว่าเมื่อลดเถ้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดขึ้นสามารถพัฒนากำล้งอัดมอร์ตาร์ทให้สูงขึ้นได้ และเมื่อลดเถ้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดขึ้นเป็น G2P ความสัมพันธ์ระหว่างกำล้งอัดกับอัตราการแทนที่แสดงในภาพที่ 7 พบว่าค่ากำล้งอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ทเกิดเนื่องจากความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่สูงขึ้น ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่มีความละเอียดสูง สามารถแทรกสอดช่องว่างของเพสต์ส่งผลให้มอร์ตาร์ทมีเนื้อแน่นขึ้น กำล้งอัดจึงสูงขึ้น



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการแทนที่และกำล้งอัดมอร์ตาร์ทที่ผสม
 เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการแทนที่และกำลังอัดมอร์ต้าที่ผสม
 ใ้ถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

2.5.3 ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมใ้ถ้าปาล์มน้ำมันและใ้ถ้าไม้อย่างพารา (ไตรเทพ แสนวงศ์, สุภาพร เชื้อนขันธุ์, โสภณ มุสิกะสังข์ , 2544)

โครงการนี้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมใ้ถ้าปาล์มน้ำมันและใ้ถ้าไม้อย่างพาราในอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และแทนที่ด้วยใ้ถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 8.6, 16.27 และ 24.87 ตามลำดับ แล้วทดสอบหาค่าความชื้น เหลวปกติ และกำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน

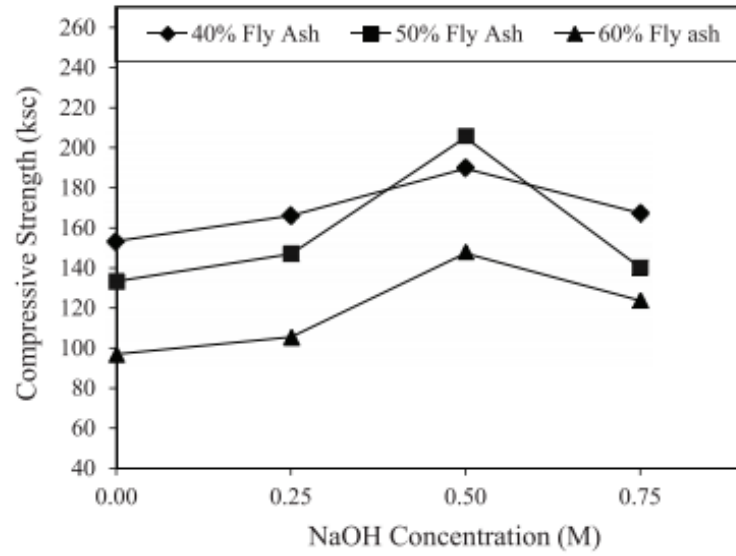
ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้กำลังอัดเฉลี่ยสูงที่สุด จากตารางแสดงค่าความต้องการน้ำของมอร์ต้า พบว่า ความต้องการน้ำของมอร์ต้าผสมใ้ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีร้อยละการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าใ้ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีความพรุนสูงทำให้การดูดซึมน้ำมีค่ามาก

ตารางที่ 2.11 แสดงความต้องการน้ำและความชื้นเหลวปกติของมอร์ต้า

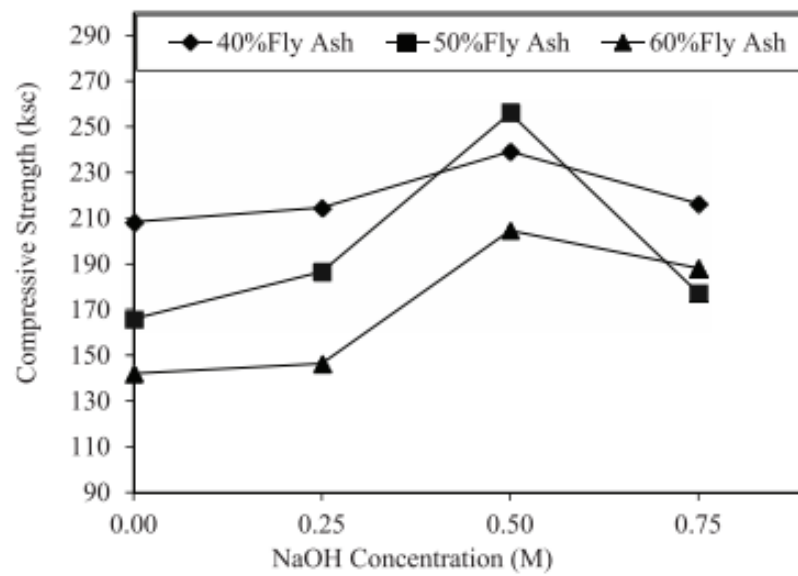
Type of Mortar	W/(C+P)	Flow
OP10	0.775	115
OP20	0.840	110
OP30	0.945	111
OP40	0.965	114

2.5.4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน (วิเชียร ชาติ, 2557)

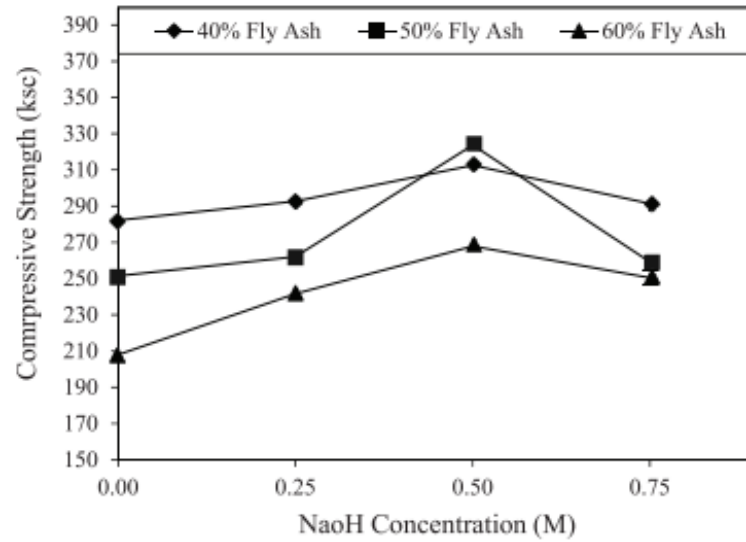
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม³ หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตที่ปริมาณสูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH มากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานคอนกรีต เนื่องจากให้กำลังอัดที่สูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 22 ที่อายุ 28 วัน



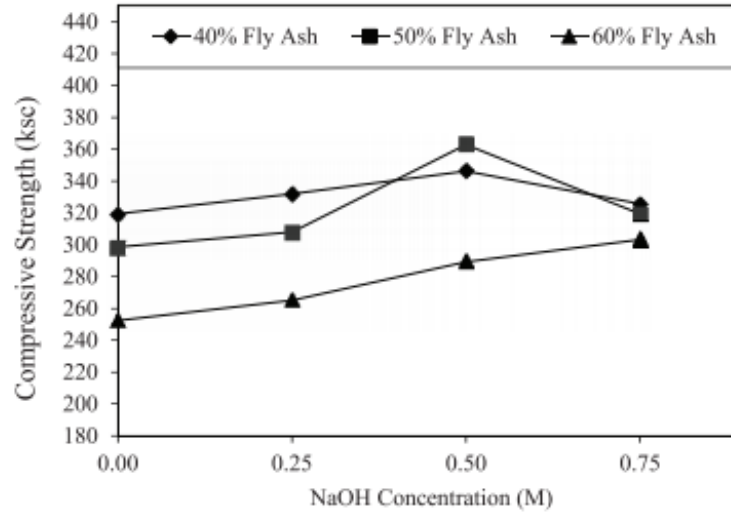
ภาพที่ 2.15 อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน



ภาพที่ 2.16 อายุบ่มคอนกรีต 7 วัน



ภาพที่ 2.17 อายุบ่มคอนกรีต 14 วัน



ภาพที่ 2.18 อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน

และเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในรูปของร้อยละอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม ดังตารางที่ พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน มีค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับกลุ่ม

ควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ส่งผลดีต่อการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตทั้งอายุต้นและอายุปลาย

ตารางที่ 2.12 ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุมที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

ส่วนผสม	ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
IF 40	100	100	100	100	100
IF40 - 0.25M	108	103	104	104	102
IF40 - 0.50M	124	115	111	108	108
IF40 - 0.75M	109	104	103	102	103
IF 50	100	100	100	100	100
IF50 - 0.25M	110	112	104	103	100
IF50 - 0.50M	154	154	129	122	122
IF50 - 0.75M	105	107	103	107	106
IF 60	100	100	100	100	100
IF60 - 0.25M	109	103	116	105	108
IF60 - 0.50M	152	144	129	115	114
IF60 - 0.75M	128	132	120	120	116

2.5.5 การศึกษาอิฐคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม (สุรพันธ์ สุคันธปริย,ชัย จาตุรพิทักษ์กุล , 2545)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้เพื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน จากนั้นศึกษาอิฐคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม โดยเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการเผาเศษกะลา และเส้นใยของผลปาล์มซึ่งนำมาบดจนค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0 ถึง 5 และร้อยละ 25 ถึง 30 จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20 และ 30 สำหรับหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ เพื่อศึกษากำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน นอกจากนี้ยังนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้บด และบดค้ำบนตะแกรง เบอร์ 325 ร้อยละ 25 ถึง 30 มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20, และ 30 เพื่ออัดขึ้นรูปเป็นอิฐและทดสอบกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผา แกลบและเปลือกไม้

จำนวน 3 โรงไฟฟ้า ได้นำมาใช้ศึกษาโดยนำถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ที่ ยังไม่บด และบดค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 25 ถึง 30 มาแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20 และ 30 เพื่ออัดอิฐคอนกรีตที่ผสมถ้ำเกลือ- เปลือกไม้และทดสอบกำลังอัดจนถึงอายุ 60 วัน และสุดท้ายทำการพัฒนาเครื่องอัดอิฐ เพื่อใช้ในการขึ้นรูปอิฐคอนกรีตให้ได้กำลังอัดสูงจนสามารถใช้เป็นอิฐปูพื้นซึ่งเป็นอิฐคอนกรีตที่มีคุณภาพสูง

ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมถ้ำเกลือปาล์มน้ำมันก่อนบดมีกำลังอัดที่ไม่สูงมากนักเพราะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และมีรูพรุนสูง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นวัสดุปอซโซลาน ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมถ้ำเกลือปาล์มน้ำมันที่บดจนละเอียดค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 29.2 และ 4.3 พบว่ามีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานและมีแนวโน้มของกำลังอัดสูงขึ้นเรื่อยๆซึ่งแสดงว่า ถ้ำเกลือปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ สำหรับกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่ผสมถ้ำเกลือ-เปลือกไม้หรือถ้ำเกลือปาล์มน้ำมัน พบว่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีตขึ้นอยู่กับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์คือยิ่งแทนที่มากกำลังอัดยิ่งต่ำ นอกจากนี้ยังขึ้นกับความละเอียดของถ้ำเกลือ-เปลือกไม้และถ้ำเกลือปาล์มน้ำมันด้วย คือยิ่งมีความละเอียดของถ้ำเกลือ-เปลือกไม้และถ้ำเกลือปาล์มน้ำมันสูงยิ่งทำให้กำลังอัดของอิฐคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วยและหลังจากทำการพัฒนาเครื่องอัดอิฐขึ้นมาใหม่ พบว่าเครื่องอัดอิฐที่พัฒนาขึ้นมาใหม่สามารถเพิ่มกำลังอัดของอิฐคอนกรีตให้สูงขึ้นจากการใช้เครื่องอัดอิฐเดิม และมีกำลังอัดมากเพียงพอที่ทำให้การแทนที่ด้วยถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ก่อนบดในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานใช้เป็นอิฐก่อผนังได้ คือมีกำลังอัดประมาณ 350 กก/ชม(2) ที่อายุ 28 วัน ส่วนการแทนที่ด้วยถ้ำเกลือ-เปลือกไม้บดละเอียดปานกลาง (ค้ำงตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 29.2) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดของอิฐคอนกรีต เพียงพอที่จะใช้ทำเป็นอิฐปูพื้นซึ่งมีกำลังอัดสูงกว่า 500 กก/ชม(2) ที่อายุ 28 วัน และสูงกว่าอิฐคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนด้วย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาถ้ำเกลือ-เปลือกไม้และปาล์มน้ำมันโดยการบดอนุภาคให้มีความละเอียดขึ้นทำให้มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตและทำวัสดุก่อสร้างประเภทอิฐคอนกรีตได้

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2555
2. ullaปาล์มน้ำมัน
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4. ทราย ใช้ทรายผ่านร่อนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
5. น้ำสะอาด



ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข. ullaปาล์มน้ำมัน



ค. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ง. ทราย ใช้ทรายผ่านร่อนตะแกรง

มาตรฐานเบอร์ 4

ภาพที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ

1. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.³(ภาพที่3.2 (ก.))
2. เครื่องทดสอบกำลังอัด ยี่ห้อ Toni Technik (ภาพที่3.2 (ข.))
3. ชุดทดสอบการไหลมอร์ต้าร์ (ภาพที่3.2 (ค.))
4. กระบะและเกลียงผสมมอร์ต้าร์ (ภาพที่3.2 (ง.))
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ภาพที่3.2 (จ.))



ก.แบบหล่อทรงลูกบาศก์



ข.เครื่องทดสอบกำลังอัด



ค. เครื่องทดสอบการไหลแผ่



ง. กระบะและเกียง



จ. เครื่องชั่งน้ำหนัก

ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.3 วิธีการดำเนินการโครงการงาน

การศึกษานี้มุ่งศึกษากำลังอัดของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในเฟสด้วย เถ้าปาล์มน้ำมัน โดยได้ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านปาล์มน้ำมันผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้สารละลาย NaOH ที่เข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ และแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก เพื่อทดสอบกำลัง อัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุม

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			W/B	การไหลของมอร์ตาร์ (%)
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์มน้ำมัน	ทราย		
IP20	0.8	0.2	2.75	0.55	113.75
IP30	0.7	0.3	2.75	0.50	115
IP40	0.6	0.4	2.75	0.46	113.75
IP50	0.5	0.5	2.75	0.45	110

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			W/B	การไหลของมอร์ตาร์ (%)
	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์ม	ทราย		
	พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	น้ำมัน			
IP20 - 0.25 M	0.8	0.2	2.75	0.55	113.75
IP20 - 0.50 M	0.8	0.2	2.75	0.55	113.75
IP20 - 0.75 M	0.8	0.2	2.75	0.55	113.75
IP20 - 1.00 M	0.8	0.2	2.75	0.55	113.75
IP20 - 1.25 M	0.8	0.2	2.75	0.55	113.75
IP30 - 0.25 M	0.7	0.3	2.75	0.50	115
IP30 - 0.50 M	0.7	0.3	2.75	0.50	115
IP30 - 0.75 M	0.7	0.3	2.75	0.50	115
IP30 - 1.00 M	0.7	0.3	2.75	0.50	115
IP30 - 1.25 M	0.7	0.3	2.75	0.50	115
IP40 - 0.25 M	0.6	0.4	2.75	0.46	113.75
IP40 - 0.50 M	0.6	0.4	2.75	0.46	113.75
IP40 - 0.75 M	0.6	0.4	2.75	0.46	113.75
IP40 - 1.00 M	0.6	0.4	2.75	0.46	113.75
IP40 - 1.25 M	0.6	0.4	2.75	0.46	113.75

ตารางที่ 3.2(ต่อ) ส่วนผสมมอร์ตาร์ทที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			W/B	การไหลของมอร์ตาร์ท (%)
	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	ทราย		
IP50 - 0.25 M	0.5	0.5	2.75	0.45	110
IP50 - 0.50 M	0.5	0.5	2.75	0.45	110
IP50 - 0.75 M	0.5	0.5	2.75	0.45	110
IP50 - 1.00 M	0.5	0.5	2.75	0.45	110
IP50 - 1.25 M	0.5	0.5	2.75	0.45	110

หมายเหตุ: W = น้ำหนักของสารละลาย NaOH

B = น้ำหนักของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์ม

“I” หมายถึง มอร์ตาร์ทที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

“P” หมายถึง เถ้าปาล์มน้ำมัน

“0.25M ถึง 1.25M” หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
เท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ตามลำดับ

“20, 30, 40, 50” หมายถึง มอร์ตาร์ทที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันใน
อัตราส่วนร้อยละ 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“I” หมายถึง มอร์ตาร์ทที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

“IP40” หมายถึง มอร์ตาร์ทที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย
เถ้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

“IP40 – 0.50M” หมายถึง มอร์ตาร์ทที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย
เถ้าปาล์มน้ำมันปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และผสมสาร NaOH
ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์

การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์

ตามสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 จึงได้ปริมาณของวัสดุต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการผสมมอร์ตาร์ทั้งหมด 288 ส่วนผสมเป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้หล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่มในน้ำ 3, 7, 14 และ 28 วัน ในการทดสอบกำลังอัดแต่ละอายุการบ่มได้ใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างทดสอบโดยทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ โดยใช้ อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเป็น 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณของเหลว ที่ให้ค่าการไหลมาตรฐานในช่วงร้อยละ 110 ± 5 หล่อมอร์ตาร์ และทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปบ่มในน้ำจนถึงอายุทดสอบกำลังอัด

การทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์

การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C230 เพื่อหาปริมาณน้ำที่ให้ค่าการไหล มาตรฐานในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวหน้าของโต๊ะการไหลให้สะอาดและแห้งจากนั้นวางแบบทดสอบการไหลลงตรงกลาง
2. ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบทดสอบการไหลให้มีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 20 ครั้งให้ทั่วตลอดหน้าตัดเพื่อให้มอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอในแบบ ไม่ต้องกระทุ้งให้แรงจนเกิน (ภาพที่ 3.3 (ก.))
3. ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบอีก 1 ชั้นซึ่งมีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งมอร์ตาร์เช่นเดียวกับที่กระทุ้งชั้นที่ 1 สำหรับการใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ให้มีความสูงกว่าแบบเล็กน้อยเพื่อทำการปาดหน้า
4. ภายหลังกระทุ้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าโดยการลากเกรียงเหล็กที่เก็บบดตั้งฉากกับ ผิวหน้าของแบบ
5. ยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างช้าๆ ซึ่งเวลาที่ใช้ตั้งแต่ใส่มอร์ตาร์ลงแบบจนถึงเวลาที่ยกแบบออกจากผิวหน้าโต๊ะการไหลประมาณ 1 นาที (ภาพที่ 3.3 (ข.))
6. ภายหลังจากยกแบบออกจากมอร์ตาร์ให้ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ซึ่งจะยกจารของโต๊ะการไหลขึ้นสูง 13 มม. และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบภายในเวลา 15 วินาที ในขณะที่

ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ให้ยึดโต๊ะการไหลให้แน่นอย่าให้มีการเคลื่อนตัวเพราะจะทำให้ค่าการไหลที่ทดสอบผิดพลาด

7. มอร์ตาร์อยู่บนจานของโต๊ะการไหลจะแผ่ออกไปโดยเกือบเป็นวงกลมให้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ จำนวน 4 ครั้ง ตรงตำแหน่งซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา บวกค่าที่อ่านจำนวน 4 ครั้งเข้าด้วยกัน ค่าที่อ่านคือค่าร้อยละของเส้นผ่านศูนย์กลาง ของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม (ภาพที่ 3.3 (ค.))



ก. กระทั่งมอร์ตาร์

ข. ยกแบบขึ้น

ค. วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ภาพที่ 3.3 การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

การคำนวณค่าการไหลแผ่

ค่าเฉลี่ยของร้อยละการไหลแผ่เท่ากับ $\left(\frac{D_{average}-D_0}{D_0}\right) \times 100$

D1, D2, D3 และ D4 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางการตกกระทบ (หน่วยเป็น มม.)

$$D_{average} = \frac{D1+D2+D3+D4}{4}$$

D0 = 100 มม.

ค่าเฉลี่ยของร้อยละการไหลแผ่ที่ได้ต้องอยู่ระหว่าง 110±5

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์

แบบหล่อมอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์เป็นแบบเหล็กขนาด 5 ซม. ทำจากเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว ผิวเรียบ และสามารถป้องกันไม่ให้น้ำปูนรั่วออกจากแบบในระหว่างที่เทหรือมีคอนกรีตอยู่ในแบบ ก่อนการหล่อมอร์ต้าร์จะใช้น้ำมันทาบางๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น การทาน้ำมันมากเกินไปจะทำให้

มอร์ต้าร์ผสมกับน้ำมันส่วนเกินทำให้มีปัญหาเรื่อง การแข็งตัวและลดกำลังของมอร์ต้าร์การหล่อตัวอย่าง

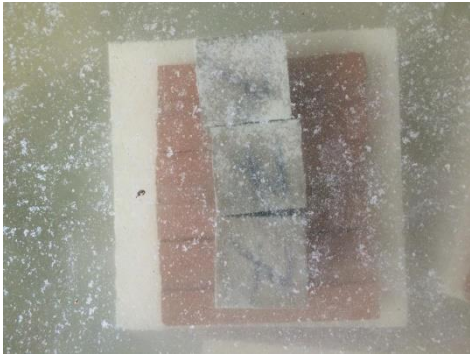
มอร์ต้าร์รูปลูกบาศก์ใส่มอร์ต้าร์ลงในแบบมาตรฐานขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 2 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งอย่าง น้อย 35 ครั้ง (ภาพที่ 3.4 (ก.)) แต่การกระทุ้งจะต้องไม่มากจนทำให้มอร์ต้าร์เกิดการแยกตัว ภายหลังจากกระทุ้งเรียบร้อยแล้วจึงปาดผิวหน้ามอร์ต้าร์ให้เรียบ (ภาพที่ 3.4 (ข.)) ทิ้งมอร์ต้าร์ไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นถอดแบบออกและนำไปปรมในน้ำ(ภาพที่ 3.4 (ค.)) และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3,7,14 และ28 วัน โดยวางตัวอย่างมอร์ต้าร์บนเครื่องทดสอบให้ตรงศูนย์กลางของเครื่อง (ภาพที่3.4 (ง.)) ให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยอัตราคงที่ประมาณ 90 -180 กิโลกรัมต่อวินาทีจนตัวอย่างวิบัติ (ภาพที่ 3.4 (จ.)) และจดบันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง



ก.กระทุ้งมอร์ต้าร์ด้วยแท่งเหล็ก



ข.ปาดผิวหน้ามอร์ต้าร์



ค. นำมอร์ตาร์ไปแช่น้ำ



ง. วางมอร์ตาร์บนเครื่องทดสอบ



จ. การวัดของมอร์ตาร์

ภาพที่ 3.4 วิธีการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมัน คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ผสมมอร์ตาร์ คุณสมบัติของค่าแรงปฏิกิริยา สมบัติของมอร์ตาร์ ตลอดไปจนวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์และผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

4.1 สมบัติของปูนซีเมนต์และ เถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอร์ตาร์โดยตรง เช่น ความสามารถในการเท ความต้องการน้ำ กำลังอัด เป็นต้น

4.1.2 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียด คล้ายแป้งฝุ่นและมีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก (Lea, 1970) ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดจะมีสีเทาและสีดำปะปนทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันส่วนที่เป็นสีดำมีลักษณะคล้ายถ่านหรือคาร์บอนซึ่งเกิดจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์แต่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดนั้นจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและมีสีเทาเข้มขึ้นเนื่องจากส่วนที่เป็นคาร์บอนนั้นได้ถูกบดไปพร้อมกับเนื้อของเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในภาพที่ 4.1



4.1 (ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่1

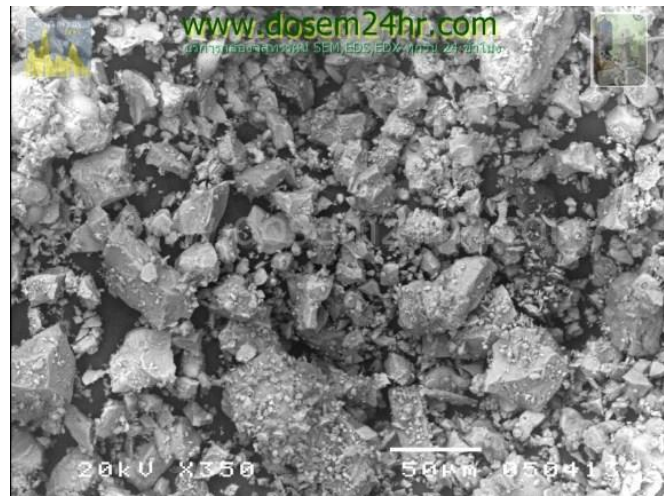


4.1 (ข) เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด

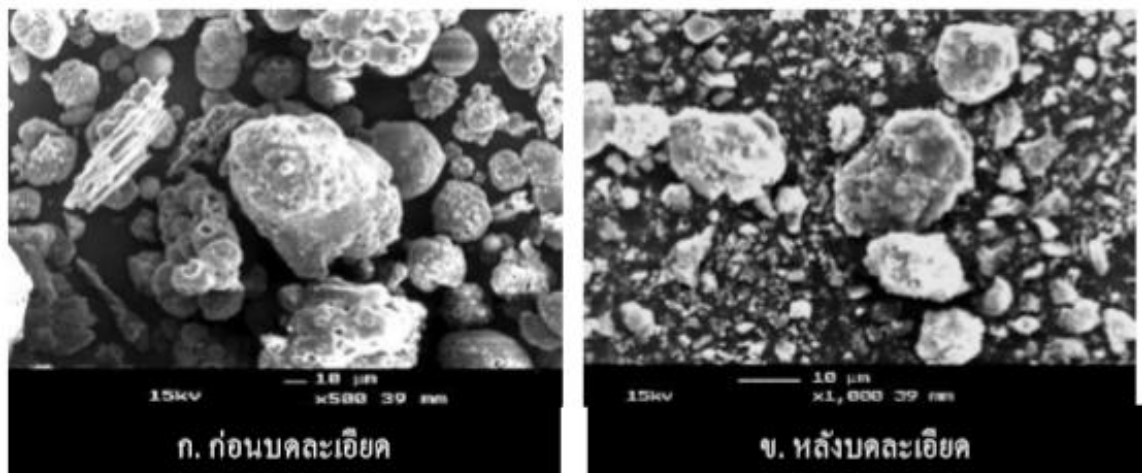
ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่1 และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด

4.1.3 ลักษณะรูปร่างอนุภาค

ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สังเกตได้ว่ามีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดละเอียดดังภาพที่ 4.3(ก) มีลักษณะค่อนข้างหยาบรูปร่างกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน พื้นผิวขรุขระ ขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีความพรุนค่อนข้างมาก สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมรูปร่างไม่แน่นอนมีความพรุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดละเอียดและมีอนุภาคเล็กกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านการบดละเอียด



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ่ายด้วยกล้อง SEM ที่ 20kv (กิโลโวลท์) x 350 เท่า สเกล 50 ไมครอน อ้างอิงจาก www.dosem.wordpress.com



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดและหลังบด

4.1.4 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์คือมีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ส่วนถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.97 ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่าน วชิรกรณ์ เสนาวัง (2554) พบว่า ถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงทั้งนี้เนื่องจาก ถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงมีความพรุนและมีโพรงอากาศภายในอนุภาคสูง แต่เมื่อผ่านการบดละเอียดแล้วทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากภาพถ่ายขยายอนุภาคของถ้าปาล์มน้ำมันในภาพที่ 4.3

4.1.5 ความละเอียด

ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้มีน้ำหนักค้ำตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) เท่ากับร้อยละ 41.2 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีอนุภาคเท่ากับ 65.5 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 Class N

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน (วชิรกรณ์ เสนาวัง, 2554)

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325 (%)	Median Particle Size, d_{50} (microns)
Original Palm Oil Fuel Ash	1.97	41.2	65.5
Ground Palm Oil Fuel Ash	2.52	1.7	10.7
Cement Type I	3.15	-	14.7

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยพบว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 60 และมี MgO เท่ากับ 1.1 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 2 เห็นได้ว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษามีค่าอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 150/C 150M สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีปริมาณ $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$, และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 69.7 มีค่า LOI ร้อยละ 10 ซึ่งจัดอยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล , วารสารคอนกรีตฉบับที่ 9 ประจำเดือน เมษายน 2553)

ออกไซด์	ร้อยละ โดยน้ำหนัก (%)				
	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	เถ้าปาล์มน้ำมัน	ซิลิกาฟุ้ง	เถ้าแกลบ
SiO_2	20	48	65	92	90
Al_2O_3	5	26	3	0.7	0.5
Fe_2O_3	3	10	2	1.2	2.0
CaO	60	5	6	0.2	0.5
MgO	1.1	2	3	0.2	0.2
SO_3	2.4	0.7	0.4	-	1.5
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	7	2.6	-
LOI	2	3	10	-	4.7

4.3 สมบัติของมวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.70 และโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.67

4.4 ต่างเร่งปฏิกิริยา

ต่างเร่งปฏิกิริยาใช้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ค่า pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-เบส ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของต่าง ที่คำนวณจาก $pH = 14 - (-\log(OH^-))$ และมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.1 กรัม/ซม.³

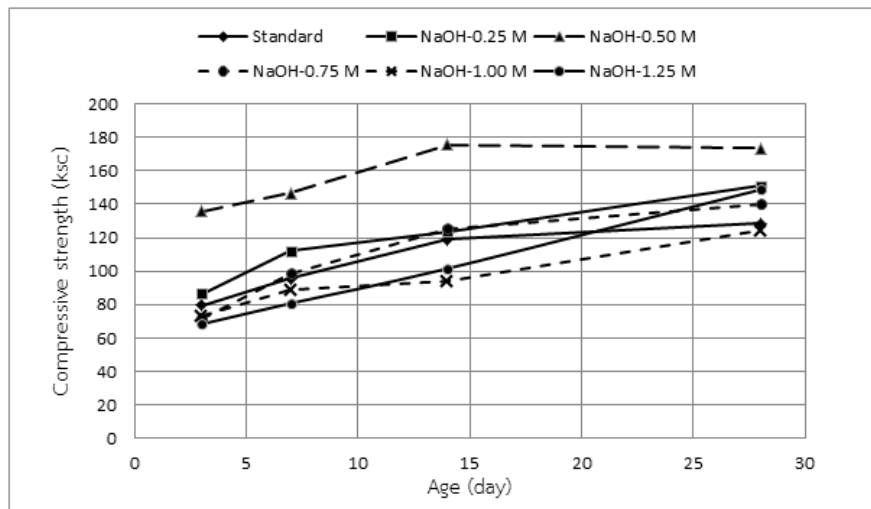
4.5 สมบัติของมอร์ตาร์

4.5.1 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

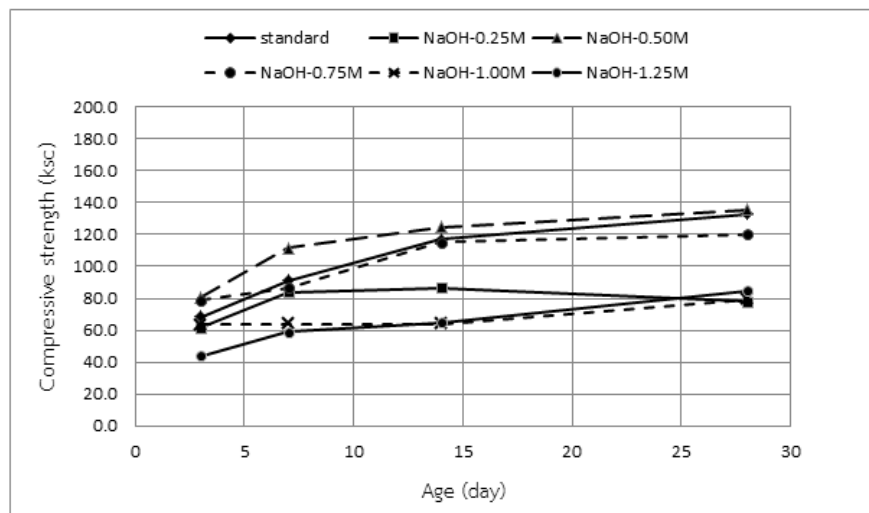
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงในตาราง 4.3 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดดังภาพที่ 4.4 พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและต่างเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้มอร์ตาร์มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้นในทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้นในทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลต่อการรับแรงเชิงกล โดยสังเกตได้จากค่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกมีแนวโน้มสูง เนื่องจากในช่วงแรกกำลังอัดของมอร์ตาร์จะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก จึงมีผลทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้นไปตามหลักคอนกรีตเทคโนโลยีทั่วไป อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ พบว่า มีความแตกต่าง ทั้งนี้อาจเกิดจากการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เร่งปฏิกิริยามีผลกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงหลัง เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุต่างๆ เทียบกับอายุ 3 วัน พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นได้ชัดเจนหลังอายุ 7 วันเป็นต้นไป เช่น มอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 3 วัน เท่ากับ 176, 174, 164 และ 133 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจาก กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างช้าๆในช่วง 14 วัน เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งส่งผลให้มีกำลังอัดลดลงเมื่อมีเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบกับอายุ 3 วัน

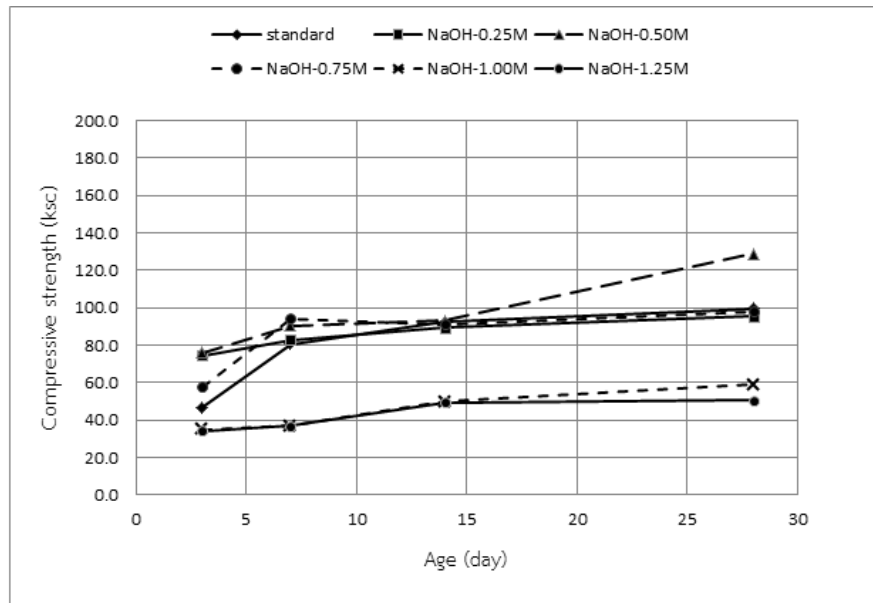
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²) - ร้อยละกำลังอัดเทียบกับอายุ 3 วัน			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
IP20	80 - 100	96 - 135	119 - 159	126 - 176
IP20-0.25	86 - 100	112 - 130	124 - 143	151 - 175
IP20-0.50	136 - 100	146 - 108	176 - 129	173 - 127
IP20-0.75	72 - 100	99 - 137	126 - 174	140 - 194
IP20-1.00	73 - 100	89 - 121	94 - 128	124 - 170
IP20-1.25	68 - 100	81 - 118	102 - 149	149 - 217
IP30	69 - 100	91 - 119	117 - 153	133 - 174
IP30-0.25	62 - 100	84 - 136	86 - 139	78 - 126
IP30-0.50	81 - 100	111 - 138	125 - 154	136 - 167
IP30-0.75	79 - 100	87 - 110	115 - 146	120 - 152
IP30-1.00	64 - 100	64 - 100	64 - 101	79 - 125
IP30-1.25	44 - 100	59 - 162	65 - 146	85 - 233
IP40	47 - 100	81 - 133	92 - 152	100 - 164
IP40-0.25	74 - 100	83 - 111	89 - 120	96 - 129
IP40-0.50	76 - 100	91 - 119	93 - 123	129 - 170
IP40-0.75	58 - 100	94 - 163	91 - 158	98 - 170
IP40-1.00	35 - 100	37 - 106	50 - 143	59 - 169
IP40-1.25	34 - 100	37 - 158	50 - 146	51 - 149
IP50	50 - 100	62 - 124	63 - 125	66 - 133
IP50-0.25	50 - 100	60 - 122	73 - 147	75 - 151
IP50-0.50	44 - 100	57 - 130	67 - 153	82 - 188
IP50-0.75	29 - 100	37 - 127	46 - 158	42 - 143
IP50-1.00	34 - 100	30 - 105	31 - 107	43 - 147
IP50-1.25	23 - 100	44 - 190	42 - 181	43 - 186



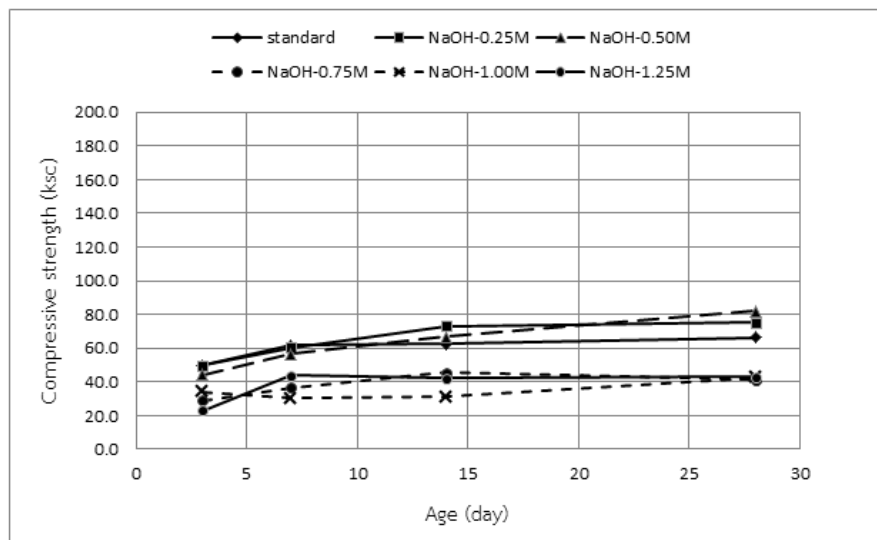
ภาพที่ 4.4(ก) มอร์ต้ารผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20



ภาพที่ 4.4(ข) มอร์ต้ารผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30



ภาพที่ 4.4(ค) มอร์ต้าร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40



ภาพที่ 4.4(ง) มอร์ต้าร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 50

ภาพที่ 4.4 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุป่มของมอร์ต้าร์

4.5.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

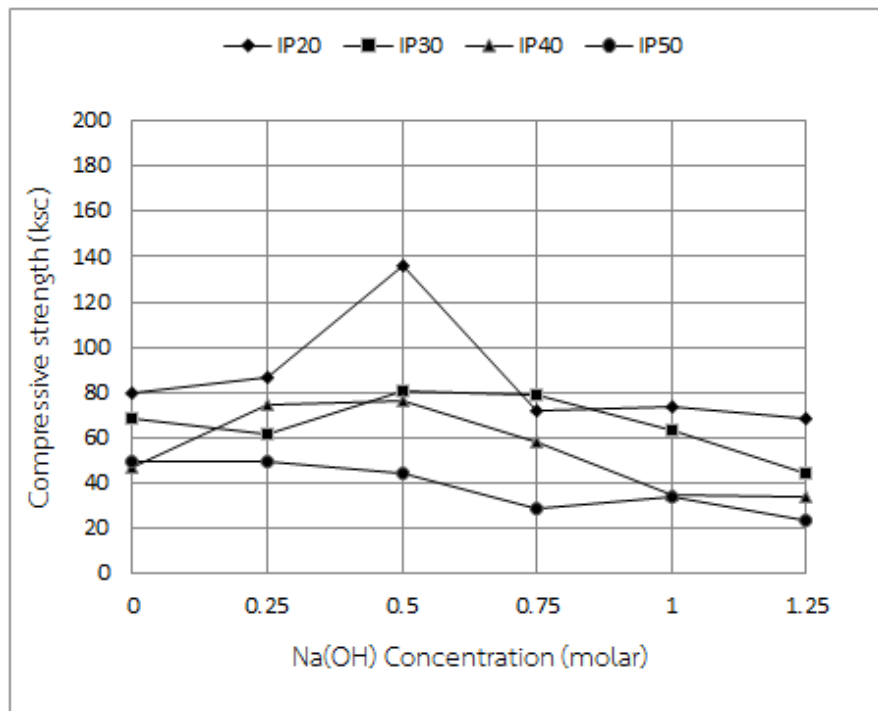
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและใช้สารละลาย NaOH ในการเร่งปฏิกิริยา ดังตารางที่ 4.4 และพิจารณาที่อายุของการบ่มช่วงต้น (3 วัน) ดังภาพที่ 4.5 (ก) พบว่า ในทุกกลุ่มของการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มควบคุมและสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH โดยแนวโน้มดังกล่าวเห็นชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุของมอร์ตาร์ถึง 28 วัน ดังรูปที่ 4.7 (ง) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกจากเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 126, 151, 173, 140, 124 และ 149 กก/ซม.² ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า การใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทุกอายุการทดสอบ เช่น กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 100, 96, 129, 98, 59 และ 50 กก/ซม.² ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดมอร์ตาร์ เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ อาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจือความชื้นจะทำให้มีความชื้นมากขึ้น และส่งผลต่อแรงยึดเกาะภายในซีเมนต์เฟสต่ำลง ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงได้ อีกอย่างเมื่อใช้ปริมาณของต่างที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณของความพรุนในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการรับกำลังของมอร์ตาร์อย่างแน่นอน การใช้ต่างเร่งปฏิกิริยาในมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันครั้งนี้ พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันและใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่ากลุ่มควบคุม เช่น มอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 20 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 125 และ 66 กก./ซม.² ตามลำดับ และเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์

เร่งปฏิกิริยาในมอร์ตาร์ดังกล่าว ได้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 151, 173, 140, 124, 149 และ 75, 82, 41, 42, 43 กก./ซม.² ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้ต่างเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานให้ผลที่ดีขึ้นในมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ร้อยละ 20 เห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุบ่มนานขึ้น แต่ในมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปริมาณที่สูงขึ้นในทุกอายุการบ่ม พบว่า ให้กำลังอัดที่ต่ำลง และเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่เข้มข้นมากขึ้น พบว่าให้กำลังอัดที่ต่ำลงทุกอายุการบ่ม จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

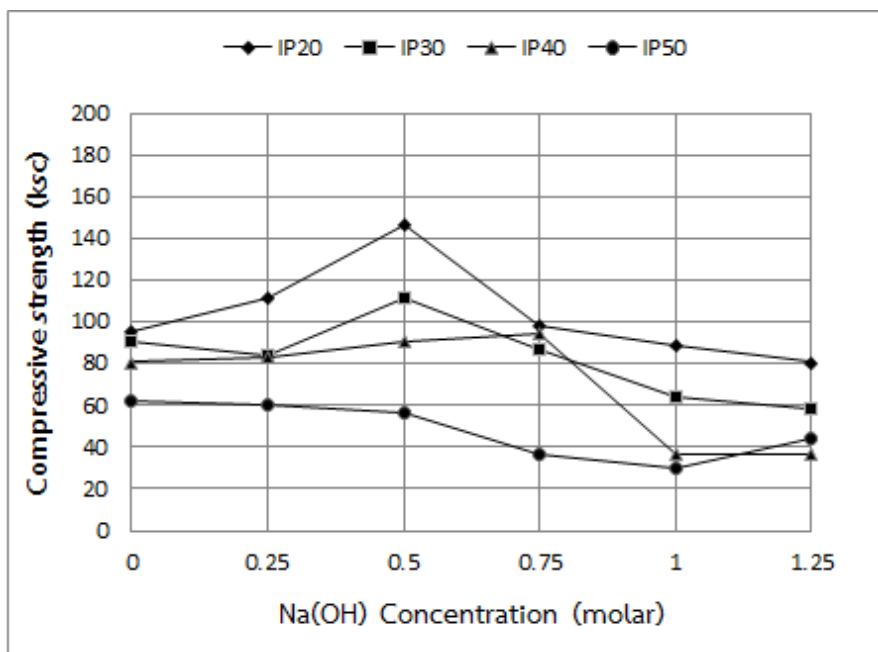
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในรูปแบบของร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม (Normalized compressive strength) ของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4.6 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน มีค่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงกว่า 0.50 โมลาร์ ซึ่งการใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในทุกกลุ่มการที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงที่สุด โดยทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุมได้เกือบถึงร้อยละ 40 (ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมเท่ากับ 136) ส่วนการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.25 โมลาร์ ให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกลุ่มควบคุมต่ำกว่า 100 ในทุกส่วนผสม

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา

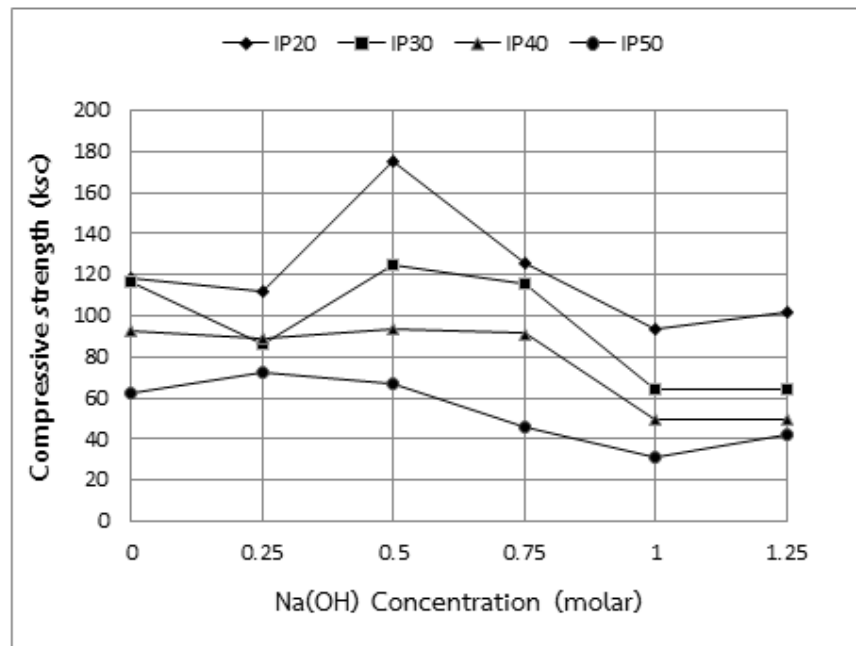
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)				กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบ กับกลุ่มควบคุม (ร้อยละ)
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
IP20	80	96	119	126	100
IP20-0.25	86	112	124	151	120
IP20-0.50	136	146	176	173	138
IP20-0.75	72	99	126	140	111
IP20-1.00	73	89	94	124	99
IP20-1.25	68	81	102	149	118
IP30	69	91	117	133	100
IP30-0.25	62	84	86	78	59
IP30-0.50	81	111	125	136	102
IP30-0.75	79	87	115	120	90
IP30-1.00	64	64	64	79	60
IP30-1.25	44	59	65	85	64
IP40	47	81	92	100	100
IP40-0.25	74	83	89	96	96
IP40-0.50	76	91	93	129	129
IP40-0.75	58	94	91	98	98
IP40-1.00	35	37	50	59	59
IP40-1.25	34	37	50	51	51
IP50	50	62	63	66	100
IP50-0.25	50	60	73	75	113
IP50-0.50	44	57	67	82	123
IP50-0.75	29	37	46	42	63
IP50-1.00	34	30	31	43	64
IP50-1.25	23	44	42	43	65



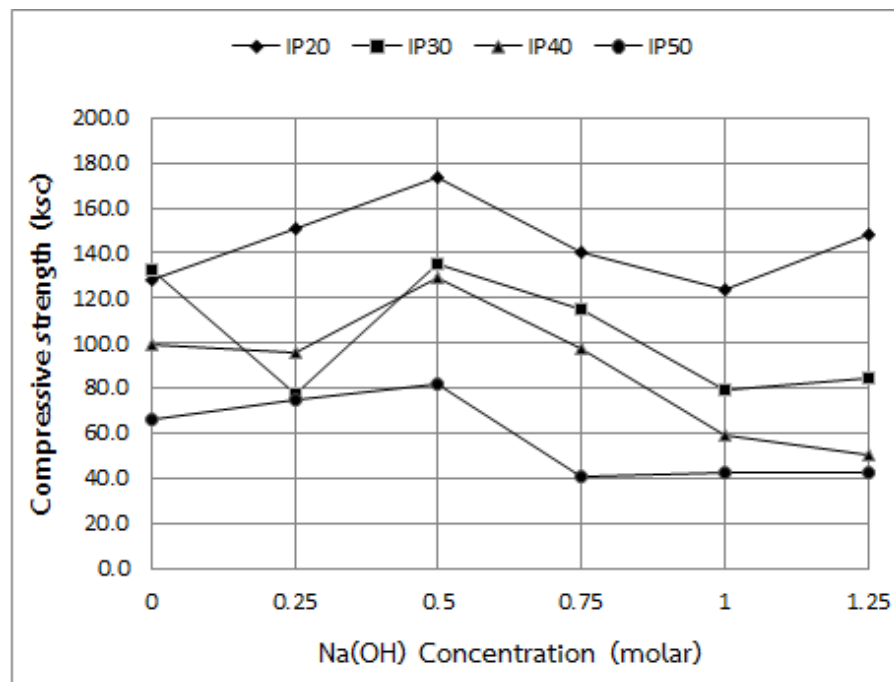
ภาพที่ 4.5(ก) อายุบ่ม 3 วัน



ภาพที่ 4.5(ข) อายุบ่ม 7 วัน

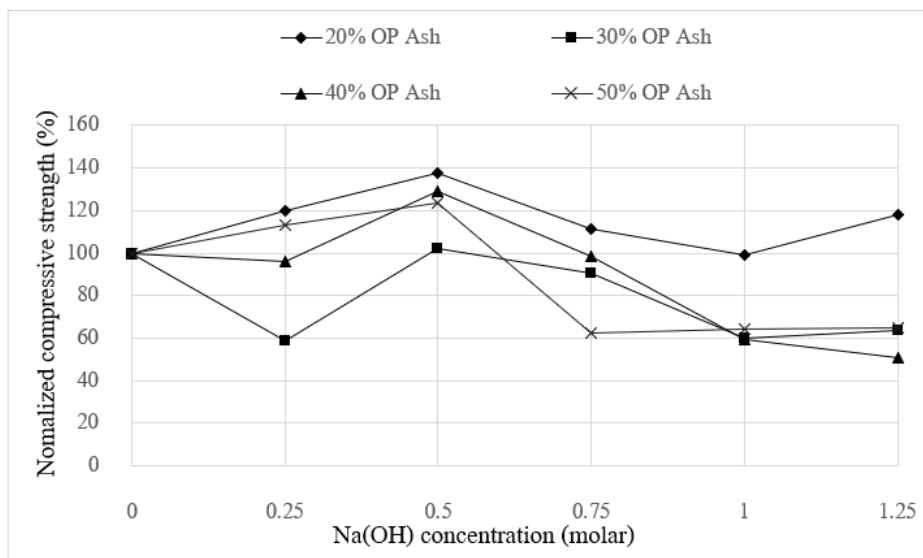


ภาพที่ 4.5(ค) อายุบ่ม 14 วัน



ภาพที่ 4.5(ง) อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์



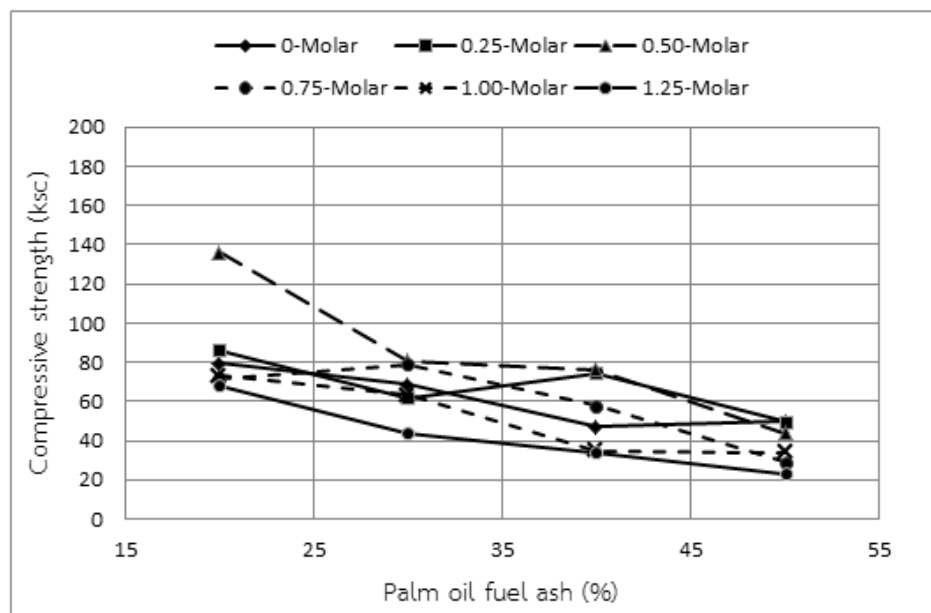
ภาพที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม

4.5.3 ผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

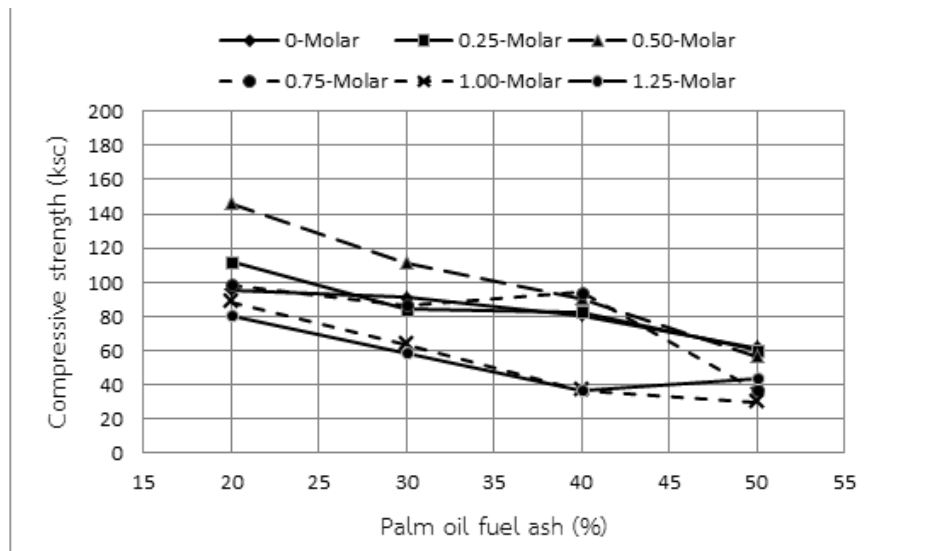
เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ดังภาพที่ 4.7 (ก), 4.7 (ข), 4.7 (ค) และ 4.7 (ง) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณมากขึ้น มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดมอร์ตาร์ โดยเห็นผลชัดเจนในมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมต่างเร่งปฏิกิริยา เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 140, 133, 100 และ 66 กก./ซม.² ตามลำดับ

ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่สูงขึ้น ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลงด้วย ประกอบกับอายุของมอร์ตาร์ที่ 28 วัน อาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ยังไม่สมบูรณ์ และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง จึงมีผลทำให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของมอร์ตาร์ น้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในมอร์ตาร์ในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัด

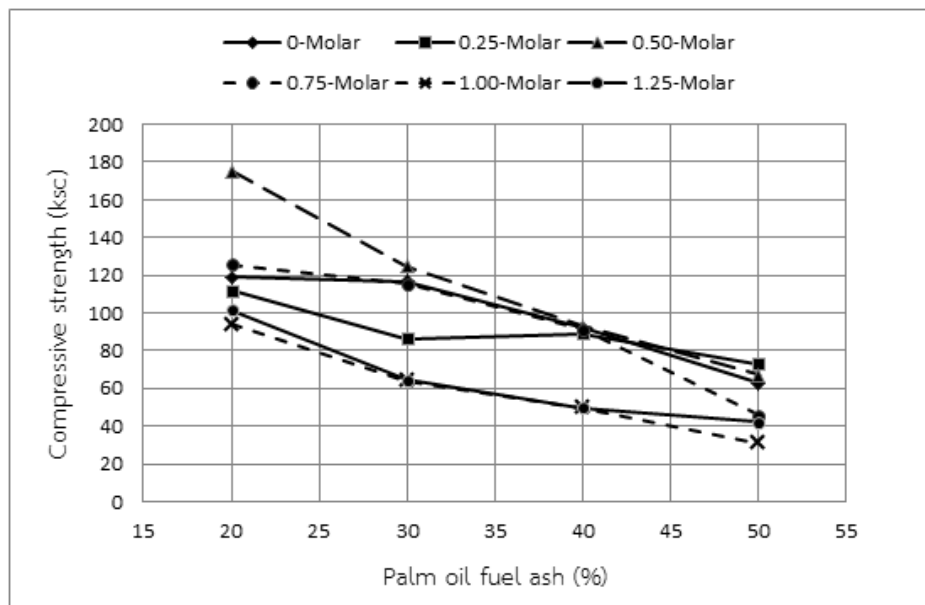
ของมอร์ตาร์ที่ใช้ต่างแรงปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ต่างแรง เช่น การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มจากร้อยละ 20 เป็น 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ใช้ต่างแรงปฏิกิริยา ที่อายุ 28 วัน ลดลงเท่ากับ 74 กก./ซม.² (ลดลงจาก 140 กก./ซม.² ในมอร์ตาร์ IP20 เป็น 66 กก./ซม.² ในมอร์ตาร์ IP50) ในขณะที่มอร์ตาร์กลุ่มเดียวกันนี้ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า มีผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ลดลง 90 กก./ซม.² (ลดลงจาก 173 กก./ซม.² ในมอร์ตาร์ IP20-0.50M เป็น 83 กก./ซม.² ในมอร์ตาร์ IP50-0.50M) ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่มากขึ้นทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่สูงขึ้นในทุกส่วนผสม เช่น การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ใช้ต่างแรงปฏิกิริยาเทียบกับกลุ่มที่ใช้ต่างแรงที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 126 กก./ซม.² และ 173 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมและปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสม สามารถเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้



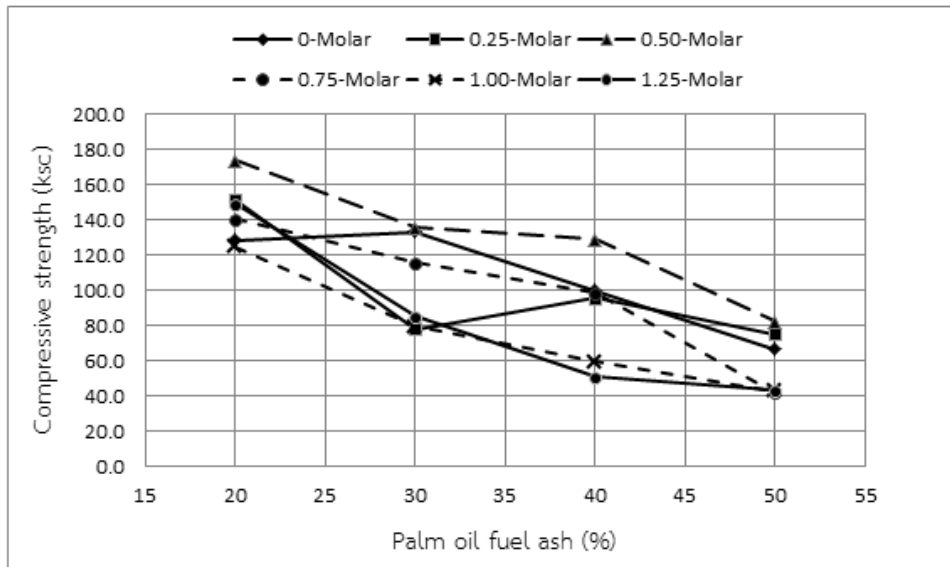
ภาพที่ 4.7(ก) อายุบ่ม 3 วัน



ภาพที่ 4.7(ข) อายุบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 4.7(ค) อายุบ่ม 14 วัน



ภาพที่ 4.7(ง) อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4.7 ผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

บทที่ 5

สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาตลอดโครงการ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันที่ใช้สารละลาย ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์

5.1.2 การใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันผสมในมอร์ตาร์ร้อยละ 20 โดยวัสดุประสาน ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่สูงที่สุด โดยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุมได้ถึงร้อยละ 38

5.1.3 การใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันผสมในมอร์ตาร์ในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้สารละลาย NaOH แรงปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้สารละลาย NaOH

5.1.4 การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และทำให้กำลังอัดดีขึ้น โดยสังเกตจากการแทนที่เถ้าปาล์ม น้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น และเมื่อแทนที่เถ้าปาล์ม น้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30, 40 และ 50 ส่งผลให้กำลังอัดลดลง รวมไปถึงการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเอาไปใช้จริงและสอดคล้องกับแนวปฏิบัติของการทำงาน เช่น การทำอิฐบล็อก

เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2545, สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก2544/45, เล่มที่43, หน้า 121
2. สุรพันธ์ สุคันธปรีย์, ชรินทร์ นมรักษ์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545, “การใช้กาก แคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต”, การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี2545, 20-23 มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199.
3. วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคู้, และ ชัยจาตุรพิทักษ์กุล, 2546, วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปี ที่26, ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม, หน้า 459-474
4. วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, “การเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้า แกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 14 ฉบับที่ 2, หน้า 27-32.
5. วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547, “การศึกษากำลังอัด และการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 15 ฉบับที่ 3, หน้า 32-39.
6. อิศสิทธิ์ แซ่ตั้ง, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, “การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ คอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2, พ.ศ. 2547, สมาคมคอนกรีตไทย ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ, เชียงใหม่, หน้า 17-22
7. ปริญญา จินดาประเสริฐ, เถ้าลอยในงานคอนกรีต, พิมพ์โดยสมาคมคอนกรีตไทย พ.ศ. 2547, หน้า 109

8. American Society for Testing and Materials, 2010, “ASTM C 618 – 08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, ASTM International, 3 pp.
9. Tay, J.H., 1990, “Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material”, *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 2, pp. 94-105.
10. Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1996, “Palm Oil Fuel Ash-A Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction”, *Proceedings of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century*, 20-23 November 1996, Bangkok, Thailand, pp. D361-D366.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุป่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP20

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	20.6	19.9	79.6
	19.7		
	19.4		
7 วัน	23.3	23.9	95.5
	24.5		
	23.8		
14 วัน	25.1	28.7	114.7
	28.1		
	32.8		
28 วัน	25	32.9	122.9
	34		
	33.2		

ตารางที่ 2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุป่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP20 – 0.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	20.3	21.6	86.4
	22.6		
	21.9		
7 วัน	25.3	28	112
	29		
	29.7		
14 วัน	25.7	31	123
	32.6		
	34.6		

28 วัน	36.7	37.7	150.9
	38.2		
	38.3		

ตารางที่ 3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุป่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP20 – 0.50

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	32.9	34	136.1
	34.3		
	34.9		
7 วัน	30.7	27.9	111.7
	27.9		
	25.2		
14 วัน	42.8	43.9	175.5
	43.6		
	45.2		
28 วัน	40	43.3	173.3
	45		
	45		

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP20 – 0.75

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	18.1	18	72
	18.1		
	17.8		
7 วัน	17.6	24.7	98.7
	27		
	29.4		
14 วัน	30	30.7	122.8
	31.1		
	31		
28 วัน	35.8	35	140
	31.3		
	37.9		

ตารางที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP20 – 1.00

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	12.8	18.3	73.3
	21.7		
	20.5		
7 วัน	22.8	22.2	88.8
	21.8		
	22		
14 วัน	26.1	25.4	101.6
	24.3		
	25.8		
28 วัน	30	31.2	124.7
	32		
	31.5		

ตารางที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP20 – 1.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	17.4	17.2	68.7
	16		
	18.1		
7 วัน	19.9	20.2	80.9
	20.1		
	20.7		
14 วัน	23	23.5	94
	23		
	24.5		
28 วัน	30.7	31.1	124.3
	31.6		
	30.9		

ตารางที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP30

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	19.4	17.1	68.5
	15.8		
	16.2		
7 วัน	22.7	22.8	91.1
	23.4		
	22.2		
14 วัน	25.9	29.2	116.9
	28.8		
	33		
28 วัน	34.7	33.2	132.8
	33.6		
	31.3		

ตารางที่ 8 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP30 – 0.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	16.6	15.5	61.9
	16.1		
	13.7		
7 วัน	20	21	84
	22.9		
	20.1		
14 วัน	20.7	21.6	86.4
	20.4		
	23.7		
28 วัน	18.6	19.5	77.9
	20.3		
	19.5		

ตารางที่ 9 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP30 – 0.50

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	19.1	20.2	80.9
	21.8		
	19.8		
7 วัน	26.2	27.8	111.3
	29		
	28.3		
14 วัน	31.3	31.2	124.8
	31		
	31.3		
28 วัน	32.3	33.9	135.5
	35.7		
	33.6		

ตารางที่ 10 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP30 – 0.75

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	19.4	19.7	78.9
	19.9		
	19.9		
7 วัน	19.8	21.7	86.8
	23.3		
	22		
14 วัน	29.6	28.8	115.2
	27		
	29.8		
28 วัน	30.3	30	120.1
	31.7		
	28.1		

ตารางที่ 11 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP30 – 1.00

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	16	15.9	63.5
	15		
	16.6		
7 วัน	16.1	15.9	63.7
	16.2		
	15.5		
14 วัน	15.3	16	63.9
	16.7		
	15.9		
28 วัน	19.6	19.8	79.3
	20.1		
	19.8		

ตารางที่ 12 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP30 – 1.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	11	11	43.9
	11		
	10.9		
7 วัน	14.4	14.7	58.8
	14.9		
	14.8		
14 วัน	17.7	16.2	64.7
	16.5		
	14.3		
28 วัน	20.8	21.2	84.8
	22		
	20.8		

ตารางที่ 13 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP40

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	11.9	12.2	48.9
	12		
	12.8		
7 วัน	20.6	20.6	82.4
	19.7		
	21.5		
14 วัน	23.2	23.1	92.3
	22.6		
	23.4		
28 วัน	24.2	24.9	99.6
	24.8		
	25.7		

ตารางที่ 14 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP40 – 0.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	18.1	18.6	74.4
	20.1		
	17.6		
7 วัน	21.7	20.7	82.9
	22.2		
	18.3		
14 วัน	21.8	22.3	89.2
	21.5		
	23.6		
28 วัน	20.1	23.9	95.6
	24.8		
	26.8		

ตารางที่ 15 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP40 – 0.50

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	18.9	19	76.1
	19.1		
	19.1		
7 วัน	22.3	22.7	94.1
	23.5		
	22.2		
14 วัน	25.8	24.6	100.1
	24.5		
	23.6		
28 วัน	32.7	31.7	126.8
	31.5		
	30.9		

ตารางที่ 16 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP40 – 0.75

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	14.7	14.5	57.9
	15.3		
	13.4		
7 วัน	23.4	23.5	91.9
	24		
	23.2		
14 วัน	22.4	22.8	98.1
	24.5		
	21.6		
28 วัน	23.8	24.5	99.8
	25.5		
	24.3		

ตารางที่ 17 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP40 – 1.00

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	9	9.2	36.8
	9.4		
	9.2		
7 วัน	9.6	9.7	38.9
	9.9		
	9.7		
14 วัน	12.5	13	51.9
	13.5		
	12.9		
28 วัน	15	15.7	62.8
	16.7		
	15.4		

ตารางที่ 18 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP40 – 1.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	8.6	8.5	33.9
	8.5		
	8.3		
7 วัน	8.5	8.6	34.3
	8.3		
	8.9		
14 วัน	11.5	11.9	47.7
	11.9		
	12.4		
28 วัน	12.6	12.6	50.5
	12.3		
	13		

ตารางที่ 19 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP50

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	10.8	12.1	48.3
	13		
	12.4		
7 วัน	14.8	14.7	58.8
	14.2		
	15.1		
14 วัน	14.8	15.6	62.5
	16.8		
	15.3		
28 วัน	11.2	16.6	66.4
	19.3		
	19.3		

ตารางที่ 20 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP50 – 0.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	11.1	11.4	45.6
	12.2		
	10.9		
7 วัน	14.3	14.2	56.7
	14.4		
	13.8		
14 วัน	16.9	16.7	66.9
	16.6		
	16.7		
28 วัน	25.2	18.8	75.1
	15.3		
	15.8		

ตารางที่ 21 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP50 – 0.50

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	11.4	12	48.1
	11.9		
	12.8		
7 วัน	15.5	15.1	60.3
	15.6		
	14.1		
14 วัน	17.1	18.2	72.9
	19.3		
	18.3		
28 วัน	19.7	20.5	82
	21		
	20.8		

ตารางที่ 22 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP50 – 0.75

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	7.1	7.2	28.9
	7.4		
	7.2		
7 วัน	7.8	9.2	36.8
	8.5		
	11.3		
14 วัน	11.4	11.4	45.6
	11		
	11.8		
28 วัน	11.4	10.4	41.5
	10.4		
	9.3		

ตารางที่ 23 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP50 – 1.00

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	8.5	8.5	34.1
	8.2		
	8.9		
7 วัน	10.6	11	44
	10.3		
	12.1		
14 วัน	10.9	10.5	42.1
	10.3		
	10.4		
28 วัน	9.8	10.6	42.5
	10.7		
	11.4		

ตารางที่ 24 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันของ IP50 – 1.25

อายุ	กำลังอัด (KN)	เฉลี่ย(KN)	(ksc.)
3 วัน	6.1	5.8	23.2
	5.5		
	5.8		
7 วัน	7.9	7.6	30.3
	7.5		
	7.3		
14 วัน	8.8	8.5	33.9
	8.5		
	8.1		
28 วัน	10.8	10.8	43.2
	10.9		
	10.7		

ผลของต่างเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
 EFFECT OF ALKALINE ACTIVATOR ON COMPRESSIVE STRENGTH
 OF PALM OIL FUEL ASH MOTAR

ภัทราภรณ์ บ่อทรัพย์ และ กฤติยา วงษ์ไพศาล

Phattaraporn Borsap and Kittiya Wongpaisal

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 2130

โทร 0-3810-2222 E-mail : 58050705@go.buu.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการนี้มุ่งศึกษาผลการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน ในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันนี้ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมัน ปาล์มจะเหลือกากปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง โดยโครงการนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความ

เข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ และแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ใช้ทรายแห้งที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เป็นมวลรวม โดยใช้อัตราส่วน เถ้าปาล์มน้ำมัน : ทราย เท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม³ ทำการถอดแบบหลังหล่อตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และทำให้กำลัง

อัดดีขึ้น โดยสังเกตจากการแทนที่เถ้าปาล์ม น้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น และเมื่อ แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30, 40 และ 50 ส่งผลให้กำลังอัดลดลง รวมไปถึง การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง เช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: กำลังอัด โซเดียมไฮดรอกไซด์ เถ้าปาล์ม น้ำมัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอร์ตาร์

Abstract

This project aims to study the effect of compressive strength of mortar mixed with palm oil ash and sodium hydroxide catalysts. Oil palm ash is a by-product of the oil palm production process. In the production of oil from this oil palm at the end of the palm oil extraction process will be left palm waste which is a biomass that can be used as fuel. The resulting palm oil ash is rarely used when compared to the amount that occurs each year, most of which have to be discarded. This project uses the concentration of sodium hydroxide

solution with a concentration of 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 and 1.25 molar and replacing oil palm ash in Portland cement type 1 equals 20, 30, 40 and 50 percent using dry sand sifted through sieve No. 4 as aggregate using palm oil ash ratio: Sand is equal to 1: 2.75 by weight. sample mortar cuboid shape, size 50x50x50 mm^3 , take off form after sample casting at 24 hours and the compressive strength test at 3, 7, 14 and 28 days.

The results showed that the use of NaOH solution with a concentration of 0.50 molar. Resulting in a complete pozzolan reaction and increasing compressive strength by observing the replacement of oil palm ash in Portland cement type 1 at 20 percent by weight of the binder material resulting in increased compressive strength of mortar and when replacing palm oil ash increased to 30, 40 and 50 percent, resulting in reduced compressive strength, as well as the use of NaOH solutions that have a higher intensity than 0.50 molar, resulting in compressive strength values Decrease as well

Keywords: Compressive strength, Mortar, NaOH (Sodium hydroxide), Oil palm ash, Portland cement

1. บทนำ

ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน ในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันนี้ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยก่อนการนำกากปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล จะนำทะลายปาล์มและเปลือกปาล์มไปผ่านกระบวนการตีให้เป็นเส้นใย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น จากนั้นจึงนำเส้นใยและทะลายปาล์มไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบพลูอิดไดซ์เบด

และหลังจากการเผาพบว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี ถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา นอกจากนี้นโยบายของรัฐที่จะนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น เป็นไบโอดีเซล ซึ่งทำให้ต้องมีการขยายพื้นที่

ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าอาจจะใช้พื้นที่ในการปลูกปาล์มน้ำมันถึง 10 ล้านไร่จึงจะเพียงพอต่อการนำมาใช้ในไบโอดีเซลได้ ซึ่งหากโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนงานที่ตั้งไว้จะส่งผลให้เกิดถ้าปาล์มน้ำมันจำนวนมาก ซึ่งกว่าปัจจุบันถึง 6 เท่าต่อปี และย่อมสร้างปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งให้มากยิ่งขึ้น การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต Tangchirapat et al. (2009) พบว่าการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวและการสูญเสียน้ำในคอนกรีตหลังแข็งในสารละลายซัลเฟตลดลง ตลอดจนการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วนถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในคอนกรีต เนื่องจากไม่สามารถต้านทานการทำลายจากซัลเฟตได้และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำมาก ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่กำลังอัดของมอร์ต้าที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันว่ามีค่ากำลังอัดสูงหรือต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมหรือไม่

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความเข้มข้นของด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เหมาะสมที่จะ ทำให้มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันรับกำลังอัดสูงสุดและหาปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมที่จะทำให้มอร์ตาร์รับกำลังได้สูงสุด

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- ทราย ใช้ทรายผ่านร่อนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4

3.2 วิธีการทดสอบ

การศึกษานี้มุ่งศึกษากำลังอัดของการแทนที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในมอร์ตาร์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยได้ศึกษา คุณสมบัติต่าง ๆ ของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่าน ปาล์มน้ำมันผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หล่อในแบบทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม³ และใช้สารละลาย Ca(OH)_2 ที่เข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ และแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ ร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ใช้อัตราส่วน ระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1: 2.75

โดยน้ำหนัก เพื่อทดสอบกำลัง อัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

สัญลักษณ์ที่ใช้ประกอบด้วย I หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน , P หมายถึง เถ้าปาล์ม น้ำมัน , 0.25M ถึง 1.25M หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ตามลำดับ, “20, 30, 40, 50” หมายถึง มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วย เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



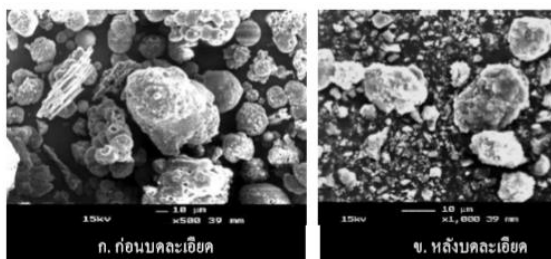
รูปที่ 1 กองเถ้าปาล์มน้ำมัน

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งฝุ่นและมีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก ส่วนเถ้าปาล์ม

น้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดจะมีสีเทาและสีดำปะปนทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันส่วนที่เป็นสีดำมีลักษณะคล้ายถ่านหรือคาร์บอนซึ่งเกิดจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์แต่ถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียดนั้นจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและมีสีเทาเข้มขึ้นเนื่องจากส่วนที่เป็นคาร์บอนนั้นได้ถูกบดไปพร้อมกับเนื้อของถั่วปาล์มน้ำมัน ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สังเกตได้ว่ามีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ส่วนถั่วปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการบดละเอียดดังรูปที่ 2 มีลักษณะค่อนข้างหายาบริบูรณ์รูปร่างกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน พื้นผิวขรุขระ ขนาดไม่สม่ำเสมอและมีความพรุนค่อนข้างมาก สำหรับถั่วปาล์มน้ำมันบดละเอียดจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมรูปร่างไม่แน่นอนมีความพรุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับถั่วปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดละเอียดและมีอนุภาคเล็กกว่าถั่วปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านการบดละเอียด



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุ

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์คือมีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ส่วนถั่วปาล์มน้ำมันก่อนบดละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.97 ถั่วปาล์มน้ำมันก่อนบดละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้มีน้ำหนักข้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) เท่ากับร้อยละ 41.2 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีอนุภาคเท่ากับ 65.5 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 Class N

4.2 คุณสมบัติทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 60 และมี MgO เท่ากับ 1.1 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 2 เห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษามีค่าอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 150/C 150M สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของถั่วปาล์มน้ำมันจะมีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 69.7 มีค่า LOI ร้อยละ 10 ซึ่งจัดอยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)				
	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เถ้าถ่านหินเผาไหม้	เถ้าปาล์มน้ำมัน	ซิลิกาฟูม	เถ้ากลบ
SiO ₂	20	48	65	92	90
Al ₂ O ₃	5	26	3	0.7	0.5
Fe ₂ O ₃	3	10	2	1.2	2.0
CaO	60	5	6	0.2	0.5
MgO	1.1	2	3	0.2	0.2
SO ₃	2.4	0.7	0.4	-	1.5
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	7	2.6	-
LOI	2	3	10	-	4.7

4.3 สมบัติของต่างเร่งปฏิกิริยา

ต่างเร่งปฏิกิริยาใช้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ค่า pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-เบส ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของต่าง

4.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและต่างเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้มอร์ตาร์มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้นในทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้นในทุกส่วนผสม ค่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกมีแนวโน้มสูง เนื่องจากในช่วงแรกกำลังอัดของมอร์ตาร์จะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก จึงมีผลทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้นไปตามหลักคอนกรีตเทคโนโลยีทั่วไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผล

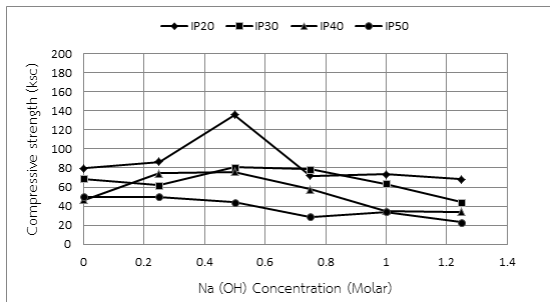
ของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์พบว่า มีความแตกต่าง ทั้งนี้อาจเกิดจากการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เร่งปฏิกิริยามีผลกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงหลัง เมื่อพิจารณาผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุต่างๆ เทียบกับอายุ 3 วัน พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นได้ชัดเจนหลังอายุ 7 วันเป็นต้นไป

ตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์

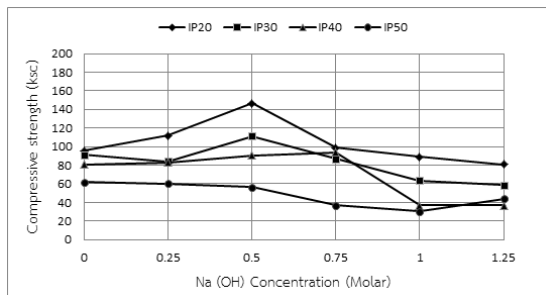
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
IP20	80	96	119	126
IP20-0.25	86	112	124	151
IP20-0.50	136	146	176	173
IP20-0.75	72	99	126	140
IP20-1.00	73	89	94	124
IP20-1.25	68	81	102	149
IP30	69	91	117	133
IP30-0.25	62	84	86	78
IP30-0.50	81	111	125	136
IP30-0.75	79	87	115	120
IP30-1.00	64	64	64	79
IP30-1.25	44	59	65	85
IP40	47	81	92	100
IP40-0.25	74	83	89	96
IP40-0.50	76	91	93	129
IP40-0.75	58	94	91	98
IP40-1.00	35	37	50	59
IP40-1.25	34	37	50	51
IP50	50	62	63	66
IP50-0.25	50	60	73	75
IP50-0.50	44	57	67	82
IP50-0.75	29	37	46	42
IP50-1.00	34	30	31	43
IP50-1.25	23	44	42	43

เมื่อพิจารณาที่ผลของความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดใน ทุกกลุ่มของการแทนที่ของถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่า กลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH โดยแนวโน้มดังกล่าวเห็นชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุของมอร์ตาร์ถึง 28 วันซึ่งผล ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ

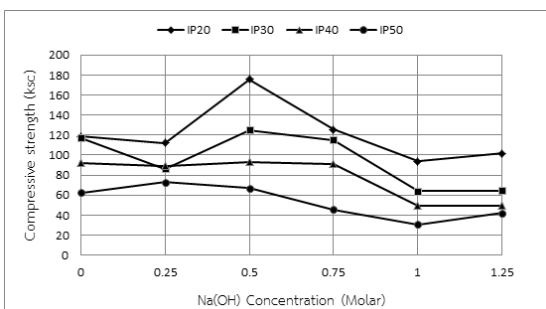
สารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกจากแก้วปาล์มน้ำมัน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันการลดลงของ กำลังอัดมอร์ตาร์ เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ อาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการเอาซิลิกาและอลูมินาจากแก้วปาล์มน้ำมัน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจอความชื้นจะทำให้มีความชื้นมากขึ้น และส่งผลต่อแรงยึดเกาะภายในซีเมนต์เฟสต่ำลง ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงได้ อีกอย่างเมื่อใช้ปริมาณของต่างที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณของความพรุนในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการรับกำลังของมอร์ตาร์อย่างแน่นอน การใช้ต่างแรงปฏิกิริยาในมอร์ตาร์ที่ผสมแก้วปาล์มน้ำมันครั้งนี้ พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่แก้วปาล์มน้ำมันและใช้ สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่ากลุ่มควบคุม



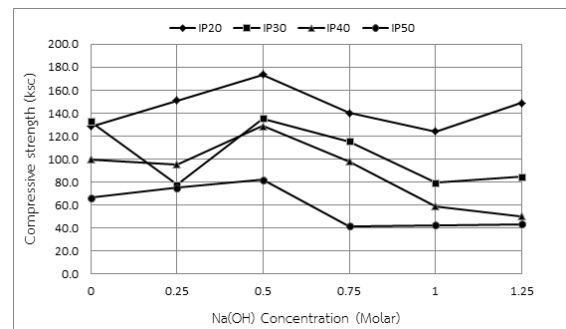
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 3 วัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 14 วัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน

เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันสูงขึ้น ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลงด้วย ประกอบกับอายุของมอร์ตาร์ที่ 28 วัน อาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ยังไม่สมบูรณ์ และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง จึงมีผลทำให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของมอร์ตาร์ น้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมในมอร์ตาร์ในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ต่างแรงปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ต่างแรง

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาตลอดโครงการงาน
สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เอ้าปาล์ม น้ำมันที่ใช้สารละลาย ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ท่ำสูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH และกำลังอัดของมอร์ตาร์ท่ำที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์
2. การใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เอ้าปาล์ม น้ำมันผสมในมอร์ตาร์ท่ำร้อยละ 20 โดยวัสดุประสาน ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ท่ำที่สูงที่สุด โดยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น
3. การใช้เอ้าปาล์ม น้ำมันผสมในมอร์ตาร์ท่ำในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ตาร์ท่ำที่ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้สารละลาย NaOH
4. การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และทำให้กำลังอัดดีขึ้น โดยสังเกตจากการแทนที่เอ้าปาล์ม น้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ท่ำเพิ่มขึ้น และเมื่อแทนที่เอ้าปาล์ม น้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30, 40 และ 50 ส่งผลให้กำลังอัดลดลง รวมไปถึงการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ต่างเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ในมอร์ตาร์ท่ำที่ผสมเอ้าปาล์ม น้ำมัน โดยได้รับการสนับสนุนจาก ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วยปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก อาจารย์เที่ยง ชีวะเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและความคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำปริญญาบัตรมาโดยตลอด และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรค์ ที่รับหน้าที่เป็นกรรมการสอบปริญญาบัตร ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทำปริญญาบัตรนี้ อีกทั้ง

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2545, สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปี เพาะปลูก2544/45, เล่มที่43, 121 หน้า.
2. สุรพันธ์ สุคันธปรีย์, ชรินทร์ นมรักษ์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545, “การใช้กากแคลเซียม คาร์ไบต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ในงานคอนกรีต”, การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี2545, 20-23 มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199.
3. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคู้, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546, “วัสดุพอลิซัลฟอนชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปี ที่26, ฉบับที่4ตุลาคม-ธันวาคม, หน้า 459-474
4. วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิกเกียรติโกมล, 2546, “การเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปี ที่14ฉบับที่2, หน้า 27-32.
5. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยจาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิกเกียรติโกมล, 2547, “การศึกษากำลังอัด และการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปี ที่15ฉบับที่3, หน้า 32-39.
6. ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้งวีรชาติตั้งจิรภัทร, ชัยจาตุรพิทักษ์กุล, และ ไกรวุฒิกเกียรติโกมล, “การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุพอลิซัลฟอนในงานคอนกรีต” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2, พ.ศ. 2547, สมาคมคอนกรีตไทย ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ, เชียงใหม่, หน้า 17-22
7. ปริญญา จินดาประเสริฐ, เถ้าลอยในงานคอนกรีต, พิมพ์โดยสมาคมคอนกรีตไทย พ.ศ. 2547, 109 หน้า
8. American Society for Testing and Materials, 2010, “ASTM C 618 – 08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, ASTM International, 3 pp.
9. Tay, J.H., 1990, “Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material”, Journal

of Material in Civil Engineering, ASCE,
Vol. 2, pp. 94-105.

10. Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A.,
1996, "Palm Oil Fuel Ash-A Potential
Pozzolanic Material in Concrete
Construction", Proceedings of the
International Conference on Urban
Engineering in Asian Cities in the 21st
Century, 20-23 November 1996,
Bangkok, Thailand, pp. D361-D366.

ประวัติย่อของผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ-สกุล	นางสาวกฤติยา วงษ์ไพศาล
วัน เดือน ปี เกิด	6 มีนาคม 2540
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา จังหวัดชลบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	89/2 หมู่ 4 ตำบลทับมา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 21000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2562 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี พ.ศ.2558 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน ระยองวิทยาคม
ชื่อ-สกุล	นางสาวภัทรภรณ์ ป่อทรัพย์
วัน เดือน ปี เกิด	6 กุมภาพันธ์ 2540
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลจันทบุรีเบกษา กรมแพทย์ทหารอากาศ จังหวัดนครปฐม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	136 ม.5 ต.จรเข้สามพัน อ.อุทุมพร จ.สุพรรณบุรี 72160
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2562 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี พ.ศ.2558 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนอุทุมพร