



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลของด่างเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน

(Effect of alkaline activator on properties of mortar containing fly ash)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222654

สัญญาเลขที่ 128/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลของด่างเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน

(Effect of alkaline activator on properties of mortar containing fly ash)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤศจิกายน 2559

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ผลของค่าแรงปฏิภนต่อสมบัติของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มีงบประมาณทั้งโครงการ 485,100 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ : นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน
งบประมาณ : 485,100 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง โดยใช้ด่างในการเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผสมมอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.00 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลอมมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม³ เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในน้ำเป็นเวลา 3 7 14 28 และ 60 วัน ผลการศึกษา พบว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงขึ้นเป็น 1.25 โมลาร์

คำสำคัญ : มอร์ต้าร์, เถ้าถ่านหิน, ด่างเร่งปฏิกิริยา, กำลังอัด

Abstract

This research aimed to improve the compressive strength of high volume fly ash (FA) mortar using alkaline activator. The original fly ash from Mae Moh power plant was used as a partial replacement of Portland cement type 1 at 30, 40, 50 and 60% by weight of the binder. The NaOH concentrations of 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 and 1.25 molar were used as an alkaline activator in FA mortar. Mortar cube specimens of 50x50x50 mm³ were cast for compressive strength test at the ages of 3, 7, 14, 28 and 60 days. The results revealed that the compressive strength of mortar containing fly ash tend to increases with the NaOH concentration of 0.50 molar, especially in mortar with fly ash replacement of 50% by weight of binder. However, the compressive strength of fly ash mortar found to decreases when using the NaOH concentration up to 1.25 molar.

Keywords: Mortar, Fly ash, Alkali activator, Compressive strength

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 128/2559

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ใส่ด่างเร่งปฏิกิริยา เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต หรือวัสดุก่อสร้างอื่นๆ ให้สามารถใช้งานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปูนซีเมนต์	4
2.2 การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนในงานคอนกรีต	10
2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน	18
2.4 โชนีลไฮดรอกไซด์	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	29
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	29
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	30
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	32

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	40
4.1 สมบัติของวัสดุ	40
4.2 สมบัติของเพสต์	41
4.3 สมบัติของมอร์ตาร์	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	70
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	81
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	5
2.2 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5	6
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528–2544	16
2.4 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. 1014	17
2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014	18
2.6 ความชื้นเหลือปกติและการก่อดั้วของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน	19
2.7 ความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	20
2.8 ปริมาณน้ำที่สามารถปรับลดได้สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน	20
2.9 กำลังของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	21
3.1 ส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุม	33
3.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา	33
3.3 อายุของมอร์ตาร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้	38
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	41
4.2 ความชื้นเหลือปกติ เวลาการก่อดั้วเริ่มต้นและก่อดั้วสุดท้าย	42
4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบกับอายุ 3 วัน	50
4.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา	55

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แคลเซียมซัลไฟด์ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF	7
2.2 ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว	7
2.3 แคลเซียมซัลไฟด์ โพลีเมอร์ไฮดรอกไซด์ หรือเอททริงไกต์	8
2.4 เอททริงไกต์ และ Monosulfate	8
2.5 ปฏิกิริยาระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ	9
2.6 ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ	9
2.7 การเกิดของอนุภาคในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและซีเมนต์	10
2.8 การก่อสร้างเขื่อนภูมิพลที่จังหวัดตาก	11
2.9 เถ้าถ่านหินขนาดเล็กโดยเครื่องทดสอบ SEM ปี 2558	14
2.10 กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผสมเถ้าถ่านหิน	22
2.11 โซดาไฟ หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์	22
2.12 ความสัมพันธ์ของความหนืดพลวัตกับความเข้มข้นของด่าง NaOH	24
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	31
3.3 การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังอัด	38
3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	39
3.5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	39
3.6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างมอร์ตาร์	39
4.1 ภาพขยายของเถ้าถ่านหินแม่เมาะชนิด F โดยใช้เครื่อง SEM ปี 2558	40
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อความต้องการน้ำของเพสต์	44
4.3 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อความต้องการน้ำของเพสต์	45
4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการก่อตัวของเพสต์	47
4.5 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการก่อตัวของเพสต์	48
4.6 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่มของมอร์ตาร์	52
4.7 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์	58
4.8 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม	58
4.9 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตเริ่มมีแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีฐานข้อมูลงานวิจัยที่ยืนยันตรงกันว่า วัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีบางตัว นอกจากจะส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตต่ำลง ยังมีผลทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านต่างๆดีขึ้น เช่น ความคงทน การลดความร้อนเพื่อป้องกันการแตกร้าวในคอนกรีตหลา การป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นต้น (Cheewaket et al., 2014 ; Chalee et al., 2013 ; Chalee et al., 2010) นอกจากนี้ วัสดุปอซโซลานหลายชนิดยังเป็นผลพลอยได้หรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนลดปัญหาการกำจัดทิ้งของวัสดุเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตยังเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานได้ใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้การผลิตปูนซีเมนต์ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มลดลงด้วย อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานมีข้อด้อยในส่วนของการอัดระยะชั้นที่ต่ำ ตลอดจนวัสดุปอซโซลานบางตัวมีอนุภาคที่หยาบ ซึ่งจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ช้าและให้กำลังอัดที่ต่ำในช่วงต้น จึงเป็นเหตุที่วัสดุปอซโซลานหลายตัวไม่ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น ถ้ำชีวภาพต่างๆ ได้แก่ ถ้ำเกลือ ถ้ำปาล์ม น้ำมัน ถ้ำชานอ้อย ถ้ำเกลือเปลือกไม้ เป็นต้น เพราะถ้ำดังกล่าวถึงแม้จะมีซิลิกาและอลูมินาสูง แต่มีอนุภาคที่หยาบจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ไม่สมบูรณ์และจำเป็นต้องผ่านการบดให้ละเอียดก่อน จึงจะสามารถนำมาใช้งานได้ (Sata et al., 2012 ; Tangchirapat et al., 2009 ; Chalee et al., 2013) ดังนั้นหากสามารถหาวิธีเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกให้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ก็จะทำให้คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานมีกำลังอัดที่สูงในระยะต้น ซึ่งขดเซยข้อด้อยของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้ ตลอดจนเป็นการพัฒนาวัสดุปอซโซลานบางตัว (ถ้ำชีวมวล) ซึ่งมีอนุภาคที่หยาบและไม่สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตโดยตรง ให้สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการบด และวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีอยู่แล้วก็อาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นได้

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน

และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

การใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงผสมในวัสดุปอซโซลานจะสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานออกมาได้ (Rattanasak et al., 2009) เป็นหลักการเดียวกันกับการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงในการชะซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานในกระบวนการผลิตวัสดุอิโพลีเมอร์) โดยซิลิกาและอลูมินาที่ถูกชะออกจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่เป็นสารที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานดังกล่าวมาข้างต้น ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ด่างที่มีความเข้มข้นต่างกันในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกในมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่ต่างกันเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินให้สามารถรับแรงเชิงกลได้ในช่วงต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณเถ้าถ่านหินต่อสมบัติของมอร์ตาร์สดจากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ ความชื้น เหลวปกติ การก่อตัวต้น

1.2.2) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.2.3) เพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง โดยใช้ด่างในการเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผสมมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.00 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดสอบคุณสมบัติของเพสต์ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว และความชื้นเหลวปกติ ตลอดจนทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์สดและมอร์ตาร์แข็งตัวได้แก่ การไหลตัว และกำลังอัดหลังบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุ 7, 14, 28, และ 60 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลของการใช้ต่างในเร่งปฏิกิริยาปอชโซลาน ต่อสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้ถ้า ถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาวัสดุ ปอชโซลาน ให้สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้โดยมีกำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้น ตลอดจนเป็นแนวทาง ในการพัฒนาวัสดุปอชโซลานอื่นๆ ที่คุณภาพไม่ดีให้สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการบดให้ละเอียด ภายใต้อายุความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม

1.4.2 เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการส่งเสริมให้ใช้ประโยชน์จากวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงาน อุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์มากขึ้น โดยให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมคือ แข็งแรง ทนทาน ปลอดภัย และ ประหยัด ตลอดจนเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วย ลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบของวัตถุดิบจะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาการปรับ ส่วนประกอบทางเคมีจะให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติต่างกัน เมื่อผสมกับน้ำปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาและเกิดการก่อตัวและแข็งตัว การผสมเถ้าถ่านหินจะทำให้ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เปลี่ยนแปลง

2.1.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน ASTM C150 และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมของประเทศไทย มอก. 15 แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ คือ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) ใช้สำหรับ ลักษณะงานธรรมดาที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland cement) ใช้สำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการลดอุณหภูมิเนื่องจากสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูง งานคอนกรีตเหลาหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้าง เขื่อนคอนกรีต กำแพงดินหนา ๆ หรือท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ๆ ต่อม่อ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความแข็งแรงสูงโดยเร็ว (High early strength Portland cement) ปูนซีเมนต์ให้กำลังสูงในระยะแรกมีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ธรรมดา มีประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่ต้องใช้งานเร็ว หรือรีบแบบได้เร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้น และคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนประเภทนี้ ได้แก่ ปูนตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง และตราสามเพชร

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดความร้อนต่ำ (Low heat Portland cement) สามารถลดปริมาณความร้อนเนื่องจากการรวมตัวของปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งจะสามารถลดการขยายตัวและหดตัวของคอนกรีตภายหลังการแข็งตัว ใช้มากในการสร้างเขื่อน เนื่องจากอุณหภูมิ ของคอนกรีตต่ำกว่างานชนิดอื่น ไม่เหมาะสำหรับ โครงสร้างทั่วไปเพราะแข็งตัวช้า

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Sulphate resistance Portland cement) ชนิดทน ซัลเฟตได้สูง ใช้ในบริเวณที่น้ำหรือดิน มีค่าต่างสูง มีระยะเวลาแข็งตัวช้า และมีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม

วัสดุชนิดนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษปูนซีเมนต์แลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโคโคไมต์ ($MgCO_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในที่ใช้กันทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด โดยจะเกิดเป็นสารประกอบหลักสำคัญ 4 ชนิด เช่น ไตรแคลเซียมซิลิเกต, ไดแคลเซียมซิลิเกต, ไตรแคลเซียมอะลูมินต, เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ จะอยู่ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก โดยมีส่วนประกอบทางเคมีและชื่อย่อ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมินต (Tricalcium Aluminate)	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อะลูมิโนเฟอไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัว และแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ สารประกอบ และคุณสมบัติบางประการ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

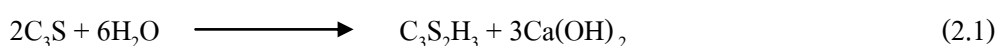
ตารางที่ 2.2 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5
(ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

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

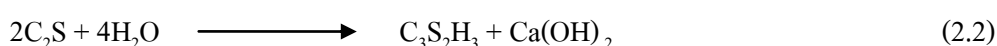
2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สารซีเมนต์ที่ใช้ในยุคแรกเป็นซีเมนต์ที่ไม่แข็งตัวในน้ำ ได้มาจากยิปซัม หรือปูนขาว ชาวอียิปต์โบราณใช้มอร์ตาร์ (Mortar) ทำจากยิปซัมที่ผ่านการเผาในงานก่อสร้างต่าง ๆ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ชนิดหนึ่ง (ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2547) ซึ่งได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) กับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) เมื่อผสมกับน้ำ สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดการก่อตัว และแข็งตัวในน้ำ ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์มีหลายชนิดสารประกอบ เหล่านี้จะทำปฏิกิริยา และมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำมีรายละเอียดดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S)

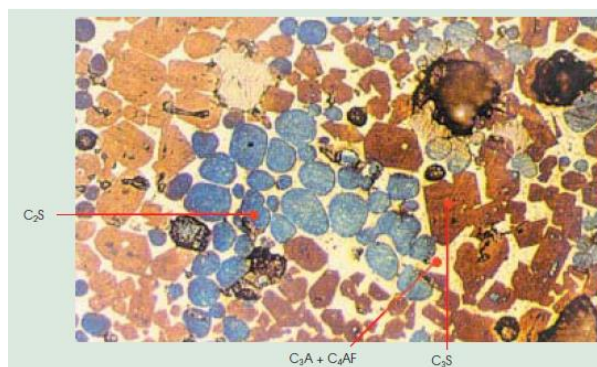


ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S)



ในทันทีที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จะมีลักษณะเป็นวุ้น ยังไม่แข็งตัวแต่จะค่อย ๆ แข็งตัว และมีการพัฒนากำลังเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น องค์ประกอบด้วยรวมของ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ผลึก C_3S ในเม็ดปูนซีเมนต์โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope ขยาย 3,000 เท่า ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แคลเซียมซิลิเกต C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF (Shetty M.S., 1982)



รูปที่ 2.2 ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

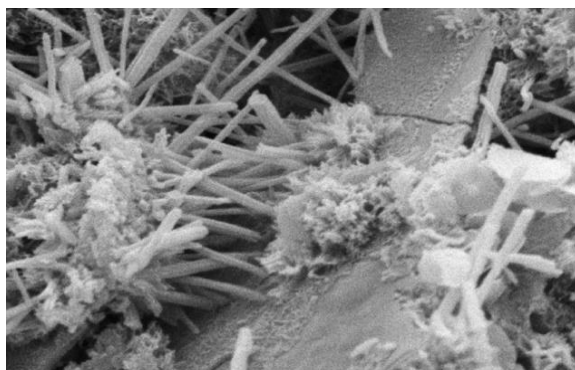
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

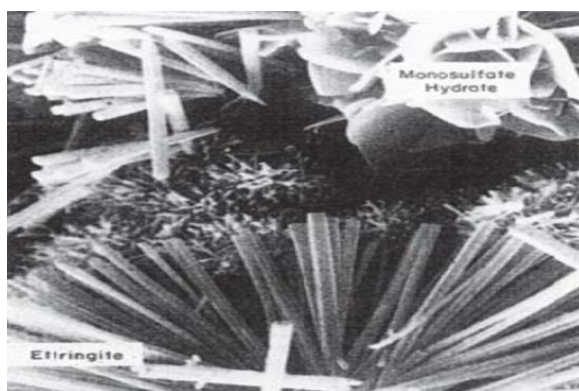


ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไปเพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตไม่ให้เกิดเร็วเกินไป เพราะเมื่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนตทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ของซัลเฟตจะได้แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไต์ (Ettringite) ดังรูปที่ 2.3 ทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง



รูปที่ 2.3 แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไกต์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

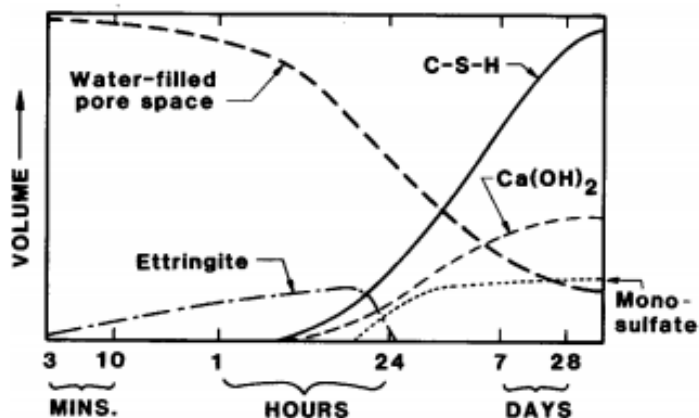
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) นี้จะเกิดในช่วงต้น โดยเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาค เหมือนเข็มของเอททริงไกต์ (Ettringite) ดังรูปที่ 2.4



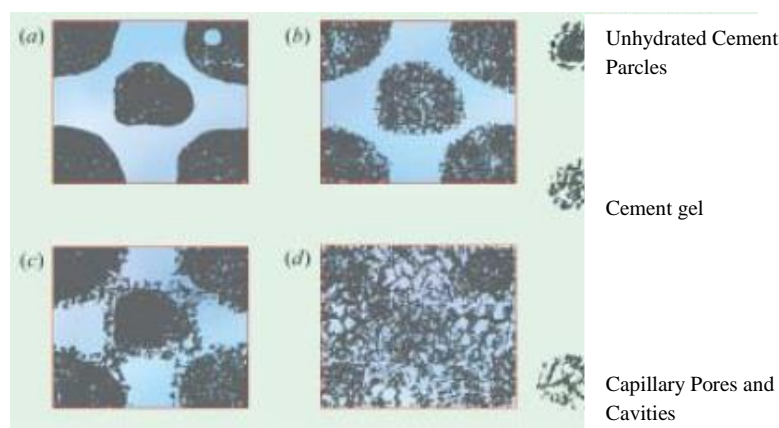
รูปที่ 2.4 เอททริงไกต์ และ Monosulfate (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.1.3 ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่านหิน

ส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการไฮเดรชันดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงปฏิกิริยาของเม็ดปูน เริ่มต้นจากเม็ดปูนเมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้ผลิตผลไฮเดรชัน 2 ส่วน ส่วนแรก ได้แก่ ผลิตผลภายนอก (Outer product) เกิดขึ้นรอบเม็ดปูน และจะขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่าง และส่วนที่สอง ได้แก่ ผลิตผลภายใน (Inner product) เกิดขึ้นที่ผิว และเข้าสู่ภายในเม็ดปูน ผลิตผลโดยรวมเรียกว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) นอกจากนั้นยังประกอบด้วยเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโพรงคาปิลลารี (Capillary pore) และโพรงอากาศอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6

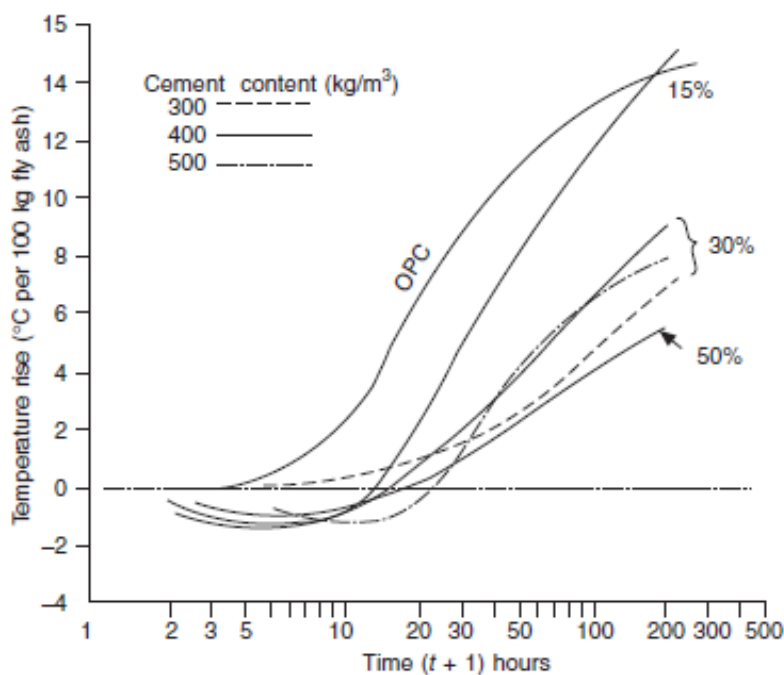


รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ (ACI255R-99, 2000)



รูปที่ 2.6 ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ (Shetty M.S., 1982)

การใส่เส้นใยแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ปริมาณสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุกตัว เช่น ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) ในคอนกรีตลดลง จะทำปฏิกิริยาช้าลง มีการคายความร้อนจากปฏิกิริยาชะลอตัวออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยอนุภาคที่เล็ก และทรงกลมทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างดีในเฟสค์ อนุภาคที่เล็กสามารถเป็นตัวแทรกเข้าไปในช่องว่างทำให้เฟสค์แน่นขึ้น และยังทำให้เกิดแหล่งสำหรับการตกผลึกของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น (Gopalan MK., 1993 & Isaia GC. et al., 2003)



รูปที่ 2.7 การเกิดของอุณหภูมิในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและซีเมนต์ (Jonh & Ban, 2003)

2.2 การใช้วัสดุพอซโซลานในงานคอนกรีต

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าถ่านหินลิกไนต์ ประเทศไทยได้เริ่มเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว ประจิด และคณะ (ประจิด จริปภา, 2523) ได้เสนอผลงานวิจัยคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ของประเทศไทยครั้งแรกในปี พ.ศ. 2523 และ 2526 นอกจากนี้ ประจิด และคณะได้นำเสนอ ผลงานวิจัยในปี พ.ศ. 2527 และ 2528 ต่อมาการวิจัยด้านนี้ได้ขยายกว้างขึ้น และในปี พ.ศ. 2535 ได้มีการนำเถ้าถ่านหินลิกไนต์ แม่เมาะประมาณ 1 แสนตัน มาผลิตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานฐานรากขนาด 30,000 ตรม. เพื่อรองรับน้ำหนักของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมด ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแทนการใช้เสาเข็มเจาะรับน้ำหนัก และไม่พบการทรุดตัวถึงปัจจุบัน จากการสนับสนุนการวิจัยโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทำให้เริ่มมีการนำ เถ้าถ่านหินไปใช้งาน การวิจัยภายในประเทศนี้มากพอที่จะเป็นฐานข้อมูลในการนำเถ้าถ่านหินมาใช้อย่างจริงจัง และเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติอย่างมาก ส่งผลให้ “กลุ่มพัฒนาเถ้าถ่านหินลิกไนต์ นำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในประเทศไทย” ได้รับรางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่นปี พ.ศ. 2545 จากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ นอกจากนี้งานวิจัยด้านเถ้าถ่านหินของไทยยังสามารถลงตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของนักวิจัยไทย และนอกจากนี้เถ้าถ่านหินถูกนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อใช้ในการก่อสร้างเขื่อนภูมิพลที่จังหวัดตากอีกด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การก่อสร้างเขื่อนภูมิพลที่จังหวัดตาก (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.2.1 วัสดุพอซโซลาน

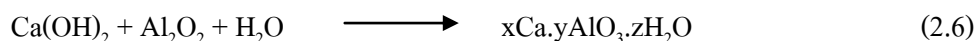
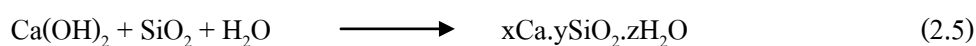
วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในคอนกรีต ในรูปของการแทนที่ บางส่วนในปูนซีเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติ บางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2551) เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น โดยทั่วไปการใช้วัสดุพอซโซลานสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้ เนื่องจากวัสดุพอซโซลานมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง และส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุพอซโซลานบางชนิดที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาแพง เช่น ซิลิกาฟูม ในขณะที่ประเทศไทยมีวัสดุพอซโซลานหลายชนิดที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้ เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ เป็นต้น และเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ว วัสดุพอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียด ที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาพอซโซลาน (Pozzolanic reaction) วัสดุพอซโซลาน ที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุพอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Matakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุพอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์ม น้ำมัน และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งในด้านของการรับกำลังอัด ความคงทนต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดส่งผลที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพ โดยเฉพาะความละเอียดเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

นอกจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวลจะถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตแล้วยังถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ เช่น คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง และการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร เป็นต้น เนื่องจากดินบางประเภทไม่เหมาะที่จะใช้งานด้านวิศวกรรมจึงต้องปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสม เช่น ใช้เถ้าถ่านหินในการถมที่แทนดินลูกรังเพราะเมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งแรงและยุบตัวน้อยกว่า อาจใช้เป็นวัสดุก่อสร้างดินถมเพื่อก่อสร้างถนนซึ่งสามารถรับน้ำหนักและกระจายน้ำหนักบรรทุกได้ดี การก่อสร้างฐานรากอาคารที่ฝังอยู่ใต้ดินช่วยลดการทรุดตัวหรือจะใช้ทำเสาเข็มเจาะ เพื่อถ่ายน้ำหนักกดจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรง

2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันมาทำ ปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6



ค่า x, y และ z จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสมการที่ 2.6 เป็นการทำปฏิกิริยากัน ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของซิลิกาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และสมการที่ 2.5 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของอลูมินาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ให้กำลังกับคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ เพราะมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

สำหรับการเร่งปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่านหิน อาจทำได้โดยวิธีทางกายภาพ (Physical activation) ทางเคมี (Chemical activation) และการใช้ความร้อน

1. ทางกายภาพ การทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินจะเพิ่มมากขึ้นและเร็วขึ้น เมื่อพื้นที่ผิว

ของเถ้าถ่านหินสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการบดเถ้าถ่านหิน (Kiattikomol K. et al., 2001; Saraswathy V. et al., 2003; Ryou J., 2004)

2. ทางเคมี สามารถทำได้โดย 2 วิธี คือ การปรับปรุงผิวเถ้าถ่านหิน (Surface treatment) และการใช้สารเคมีผสม เป็นวิธีที่นิยมมาก เนื่องจากทำได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มซัลเฟต และกลุ่มอัลคาไล (Saraswathy V. et al., 2003)

3. การใช้ความร้อน คือ การให้ความร้อนคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทำให้เถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตสูงขึ้น (Williams JI. et al., 1982 & Bamforth PB., 1980) นอกจากนี้การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ CaSO_4 สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดี

2.2.3 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงาน

ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1.00 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน และเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า และเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา เรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอนหรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า (ปริญญา จินดาประเสริฐ และอาภา สชนเสาวภาคย์, 2550)

1. ชนิดของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงาน

ความร้อน โดยมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1.1 ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และ

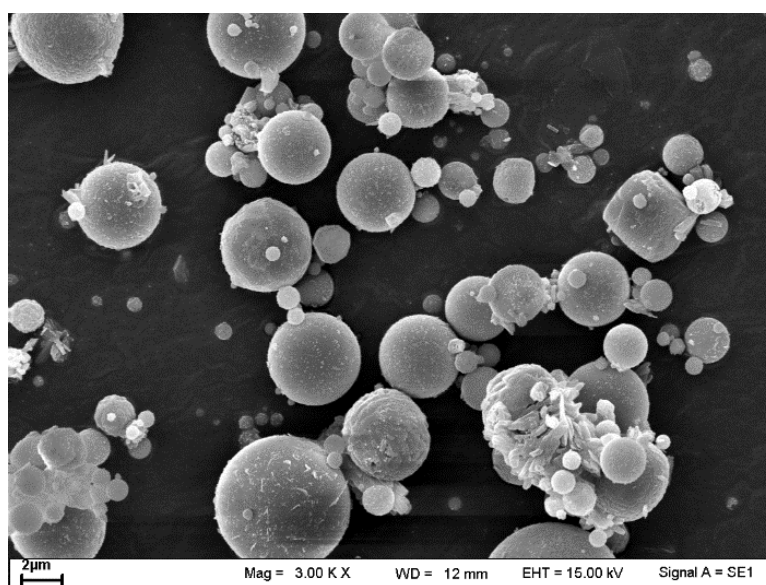
บิทูมินัสมีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่าง และวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากรังดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึง ให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

1.2 ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้ เรียกชื่ออีก

อย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียวโดยที่ ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำ ทำให้เถ้าถ่านหินชนิด C นอกจากมี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำ แล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย เถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติ เป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้าถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เถ้าถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้ มีอยู่ประมาณร้อยละ 10

2. รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เมื่อเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาป และหลอมละลายที่อุณหภูมิ สูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่ มีลักษณะทรงกลม และอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy phase) เถ้าถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของ เถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่อขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อน ไปได้ ทั้งนี้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว เนื่องจากมี ปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า จะมีทรงกลม และผิวเรียบ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เถ้าถ่านหินขนาดเล็กโดยเครื่องทดสอบ SEM ปี 2558

เถ้าถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่า ซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็ก ๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้าถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินกลวง คือ แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate glass) เนื่องจากเถ้าถ่านหินกลวงเป็นเถ้าถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้าถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง (Acoustic)

เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และผิวขรุขระ เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเถ้าถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหินจึงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน (ชัยจตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2554)

3. ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 - 5,000 ซม.²/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธีของ BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้ วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุน และที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 - 89,000 ซม.²/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.²/ก.

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet sieve) ผ่านบน ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 แนะนำให้ ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวน เถ้าถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เถ้าถ่านหิน โดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30 (ปริญญา จินดาประเสริฐและคณะ, 2550)

4. ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับ ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C188 เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.90-2.90 (Rilem, 1991) ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็ก และแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของ

เถ้านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกัน ยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรง และยังมีเถ้านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้านหินละเอียด (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2554)

5. ความต้องการน้ำ

มาตรฐาน ASTM C618 ระบุความต้องการน้ำของส่วนผสมที่มีเถ้านหินสูงสุดเท่ากับร้อยละ 105 ของส่วนผสมควบคุม โดยมาตรฐาน ASTM C311 ให้ใช้ส่วนผสมเดียวกันกับที่ใช้สำหรับการทดสอบดัชนีการพัฒนากำลัง เถ้านหินมีรูปร่างกลม จะทำให้ส่วนผสมมีความสามารถทำงานได้หรือมีความชื้นไหลได้ดีขึ้น ทำให้มีความต้องการน้ำต่ำกว่าส่วนผสมควบคุม แสดงให้เห็นว่าเถ้านหินมีผิวขรุขระ และไม่กลมจึงไม่เหมาะที่จะเอามาใช้งาน

6. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักและ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (Loss on ignition, LOI) (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2556) และมีข้อมูลดังแสดงในตารางที่

2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้านหินลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี

พ.ศ. 2528–2544 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2548)

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2528	12.0	5.9	17.3	39.5	4.6	2.0	0.80	11.5	6.3
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	2.4	1.3	2.7	1.5	0.1

7. การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีต

การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตสามารถใช้เพื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน หรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีทรงกลม จึงทำให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีขึ้น และต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตลดลง การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้กำลังอัดที่อายุต้น (ช่วงก่อน 28 วัน) ของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน แต่สามารถมีกำลังอัดสูงกว่าเมื่อมีอายุมากขึ้น (มักจะมากกว่า 28 วันขึ้นไป) นอกจากนี้ การบ่มคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินก็มีความสำคัญมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินต้องอาศัยต่างที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และต้องการความชื้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

8. ข้อกำหนดของเถ้าถ่านหิน

มาตรฐานที่ใช้เป็นข้อกำหนดเพื่อควบคุมคุณภาพของเถ้าถ่านหินมีระบุไว้ในมาตรฐานของ ASTM 311 และประเทศไทยได้ใช้ มอก. 2135-2545 เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับเถ้าถ่านหิน ที่ใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต การเปรียบเทียบข้อกำหนดทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน ระหว่างมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 กับมาตรฐาน ASTM C618 มีแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. 1014 (ASTM C618, n.p.)

ส่วนประกอบทางเคมี	ข้อกำหนด	ว.ส.ท. 1014		มาตรฐาน ASTM C618	
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	Class F	Class C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	ไม่ต่ำกว่า (%)	70	50	70	50
SO ₃	ไม่เกิน (%)	5	5	5	5
MgO	ไม่เกิน (%)	-	5	ไม่กำหนด*	ไม่กำหนด*
Na ₂ O	ไม่เกิน (%)	1.5**	1.5**	1.5**	1.5**
ความชื้น	ไม่เกิน (%)	3	3	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)	ไม่เกิน (%)	6	5	6***	6

หมายเหตุ: * ASTM C618 ไม่ได้กำหนดค่า MgO แต่ได้กำหนดในรูปของค่าเทียบเท่าแทน โดยที่ค่าเทียบเท่า เท่ากับ Na₂O + 0.658 K₂O

** ว.ส.ท. 1014 และ ASTM C618 กำหนดให้ทดสอบเป็นกรณีพิเศษ หากต้องการข้อมูลนี้

*** ASTM C618 กำหนดว่าหากเป็นเถ้าถ่านหิน Class F สามารถยอมให้การสูญเสีย

น้ำหนักจากเผาไหม้มีค่าถึงร้อยละ 12 แต่ต้องมีผลการทดสอบด้านอื่นจากห้องทดสอบประกอบ เพื่อแสดงว่าเถาถ่านหินดังกล่าวสามารถใช้ได้

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของเถาถ่านหินตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 (ASTM C618, n.p.)

คุณสมบัติทางกายภาพ	ข้อกำหนด	ว.ส.ท. 1014	ASTM C618
1. พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Specific surface area by blaine fineness)	ไม่ต่ำกว่า (ชม. ² /ก.)	2,000	ไม่กำหนด
2. ปริมาณที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร่อนแบบเปียก)	ไม่เกิน (ร้อยละ)	ไม่กำหนด	34
3. ดัชนีกำลัง			
3.1 เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน	ไม่ต่ำกว่า	75	75
3.2 เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน	(ร้อยละ)	75	75
3.3 เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่อายุ 91 วัน**		75	ไม่กำหนด
4. ความต้องการน้ำ (Water requirement) เป็นร้อยละของตัวอย่างควบคุม	ไม่เกิน (ร้อยละ)	102	105
5. ความคงตัว (Autoclave expansion or contraction) เป็นร้อยละของตัวอย่างควบคุม	ไม่เกิน (ร้อยละ)	0.8	08
6. ความหนาแน่น (แตกต่างจากค่าเฉลี่ยสูงสุด)	ไม่เกิน (ร้อยละ)	ไม่กำหนด	5.0
7. ความถ่วงจำเพาะ	ไม่ต่ำกว่า	1.90	ไม่กำหนด

หมายเหตุ: * ดัชนีกำลังตามมาตรฐาน ASTM C618 หากทดสอบที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

ค่าใดค่าหนึ่งเกินร้อยละ 75 ถือว่าเป็นตามมาตรฐาน

** มาตรฐานกำหนดให้ทดสอบเป็นกรณีพิเศษ ถ้าต้องการ

2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถาถ่านหิน

เถาถ่านหินทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีต เช่น อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน การพัฒนาโครงสร้างกำลังรับแรง และความทนทานเปลี่ยนไป เนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีต เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเพสต์ และมอร์ตาร์

1. ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสด

การใส่เถ้าถ่านหินทดแทนปูนซีเมนต์จะทำให้คุณสมบัติบางประการของคอนกรีตเปลี่ยนไป เช่น ความต้องการน้ำ ความสามารถในการทำงานได้ ระยะเวลาการก่อตัว และการเย็นน้ำ ความต้องการน้ำจะคู่กับการใช้วัสดุปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยจะมี ความสามารถในการทำงานได้ที่แตกต่างกัน

ความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์

นิยมใช้ความชื้นเหลวปกติตามมาตรฐาน ASTM C187 สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจะไม่แตกต่างกันมากนักโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของเถ้าถ่านหิน รูปร่างกลม ผิวเรียบ จะทำให้เพสต์ ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น และทำให้ความชื้นเหลวปกติของเพสต์ลดลง โดยข้อมูล

การทดสอบจะแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความชื้นเหลวปกติและการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน (จิรทรัพย์ รัตนภาส, 2545)

ส่วนผสม	ความชื้นเหลวปกติ (%)	การก่อตัวต้น (นาที)	การก่อตัวปลาย (นาที)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	25.4	75	180
เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 10%	25.2	86	180
เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 30%	24.4	90	195
เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 50%	23.9	95	225

ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

การวัดความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์จะใช้การวัดค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจะขึ้นอยู่กับปริมาณและความละเอียดของเถ้าถ่านหิน การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินทำให้ส่วนผสมลื่นไหลได้ดีขึ้น ลดความต้องการน้ำลงได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 (Chindapasirt P. et al., 2003) การใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดมากจะลดน้ำได้ไม่มากนัก เนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูง ทำให้ต้องการน้ำมาเคลือบผิวมากขึ้น

ตารางที่ 2.7 ความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (Chindapasirt, 2003)

ส่วนผสม	ความละเอียด ชม. ² /ก.	W/B	กำลังอัด (เมกะปาสกาล)			
			3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3,500	0.500	20.0	31.5	48.5	52.0
เถ้าถ่านหิน	3,000	0.458	11.5	20.5	30.5	41.5
เถ้าถ่านหินผ่านร่ง 200	3,900	0.402	15.5	19.0	38.5	53.5
เถ้าถ่านหินส่วนละเอียด	9,300	0.439	25.0	31.0	53.5	61.5
เถ้าถ่านหินหยาบ	1,800	0.572	8.5	13.5	23.0	29.0

ความต้องการน้ำของคอนกรีต

การวัดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตนิยมใช้การวัดค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C143 ที่ค่ายุบตัวเท่ากัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะใช้น้ำต่ำกว่า เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบ ทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้นและต้องการน้ำจะลดลง (Chindapasirt P. et al., 2003 & Malholtra VM. et al., 1994) สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา ACI 318-99 ได้แนะนำให้ปรับลดปริมาณน้ำ สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินดังแสดงในตารางที่ 2.8 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ทุกร้อยละ 10 สามารถลด ปริมาณน้ำได้ประมาณ 5 กิโลกรัม/ลบ.ม. แต่การใช้เถ้าถ่านหินหยาบที่มีปริมาณข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 สูงมากทำให้คอนกรีตต้องการน้ำเพิ่มได้ (Owens, 1979)

ตารางที่ 2.8 ปริมาณน้ำที่สามารถปรับลดได้สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน (ACI 318-99 , n.p.)

เถ้าถ่านหิน (ร้อยละของวัสดุประสาน)	ปริมาณน้ำที่ลด (กก./ม. ³)				
	ค่าการยุบตัว (มม.)	0-10	10-30	30-60	60-100
	เวลาวิบี (วินาที)	> 12	6-12	3-6	0-3
10		5	5	5	5
20		10	10	10	15
30		15	15	20	20
40		20	20	25	25
50		25	25	30	30

2. คอนกรีตแข็งตัว

การบ่มคอนกรีต

ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นช้า และใช้เวลานาน ดังนั้นการบ่มจึงมีความสำคัญต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การบ่มสามารถใช้การบ่มน้ำปกติ และการบ่มชื้นร่วมกับความร้อน คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทิ้งไว้ในอากาศโดยไม่ได้บ่มด้วยน้ำหรือความชื้น จะมีกำลังรับแรงที่อายุ 7 วันของคอนกรีตเดียวกันบ่มชื้น (Gopalan MK. & Haque MN., 1987) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องบ่มคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินนานกว่าคอนกรีตธรรมดา

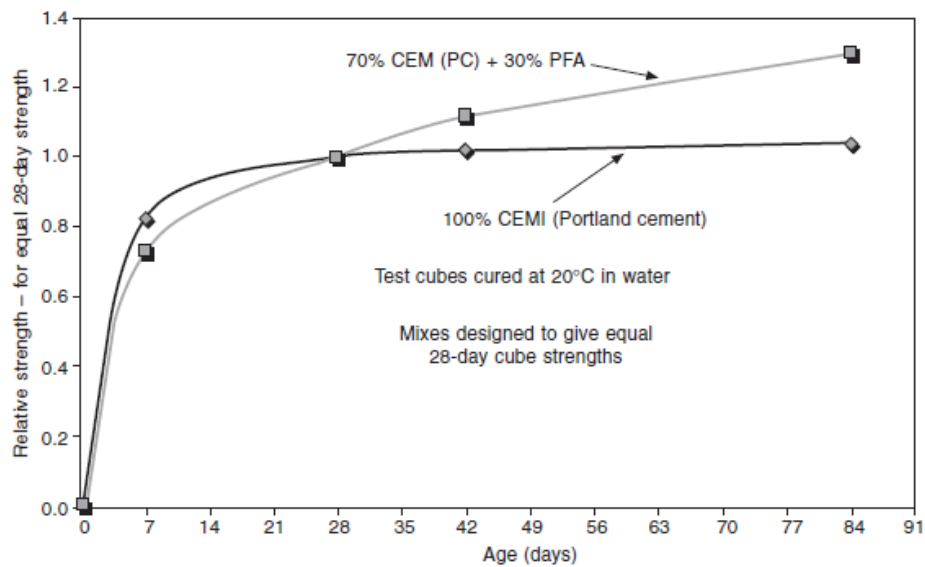
กำลังรับแรงของคอนกรีต

กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่อายุต้นจะลดลงตามปริมาณเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น (Chindapasirt P. et al., 2004; Malholtra VM. et al., 1994; ACI 318-99, 2000) ดังแสดงในตารางที่ 2.9 เนื่องจากปฏิกิริยาในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ เมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะดีขึ้นเมื่อเทียบกับ คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่มากเกินไป กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนาได้ดี และสูงกว่าคอนกรีต ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน (Malholtra VM. et al., 1994; ACI 318-99, 2000) โดยปกติเวลาที่ใช้ในการพัฒนาจะนานประมาณ 1-6 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (Samarin A., Munn RL., & Ashby JB., 1983)

ตารางที่ 2.9 กำลังของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (Chindapasirt et al., 2004)

ส่วนผสม	การยวบตัว (มม.)	กำลังอัด (เมกะปาสกาล)		
		3 วัน	7 วัน	28 วัน
OPC:FA				
100 : 0	220	46.5	52.5	57.0
80 : 20	230	44.0	49.0	56.5
60 : 40	240	26.5	32.5	55.0
40 : 60	240	23.0	27.5	47.5

หมายเหตุ: W/B เท่ากับ 0.30 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมการยวบตัว



รูปที่ 2.10 กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผสมเถ้าถ่านหิน (Samarin et al., 1983)

2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซดาไฟ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังรูปที่ 2.11 มีสถานะเป็นของแข็งสีขาว หรืออาจอยู่ในรูปของเหลวที่เป็นสารละลาย ถือเป็นสารเคมีที่มีความสำคัญมากในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันมีจำหน่ายทั้งในสถานะของแข็ง และของเหลว บางครั้งเรียกกันว่า ผงมัน ส่วนในรูปสารละลาย มักพบความเข้มข้นร้อยละ 50



รูปที่ 2.11 โซดาไฟ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซดาไฟก้อน เป็นสถานะปกติของโซดาไฟที่อยู่ในรูปของแข็ง มีลักษณะเป็นผลึก หรือผงสีขาว มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเมื่อละลายน้ำจะให้ฤทธิ์เป็นด่างแก่ใช้มากในภาคอุตสาหกรรม และมีใช้บ้างในภาคครัวเรือน และการเกษตร

2.4.1 ลักษณะเฉพาะของโซดาไฟ

เป็นก้อนผลึกหรือผงสีขาว

ละลายน้ำได้ด่างแก่

มวลอะตอมเท่ากับ 40 กรัม/โมล

ความหนาแน่น 2.1 กรัม/ซม.³ ที่ 20 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลวที่ 318 องศาเซลเซียส

จุดเดือดที่ 1390 องศาเซลเซียส

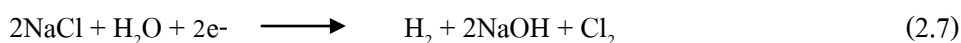
ความสามารถในการละลายน้ำ 111 กรัม/10 มล.

โซดาไฟเหลว เป็นผลิตภัณฑ์ของโซดาไฟที่อยู่ในรูปของเหลวที่ละลาย อยู่ในตัวทำละลาย (น้ำ) มีฤทธิ์เป็นด่างไม่มีกลิ่นแต่สามารถเกิดไอระเหยได้ เมื่อสัมผัสจะ ลื่นเหมือนสบู่ พบจำหน่ายมากในปัจจุบัน ได้แก่ โซดาไฟร้อยละ 32 และ 50 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้มากในภาคอุตสาหกรรม

2.4.2 การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์

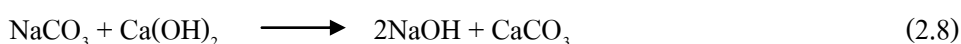
การผลิตจากสารละลาย NaCl หรือเกลือแกง

ด้วยหลักการอิเล็กโทรไลซิสของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ เมมเบรนเซลล์ (Membrane cell) และ ไดอะแฟรม เซลล์ (Diaphragm cell) โดยการนำเกลือมาแยกด้วยกระแส ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้เกิดก๊าซคลอรีน และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำในเซลล์จนเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคลอรีน ดังสมการที่ 2.7



การผลิตจากปูนขาว

ด้วยการละลายโซดา (NaCO_3) ในน้ำปูนขาว (Ca(OH)_2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการที่ 2.8

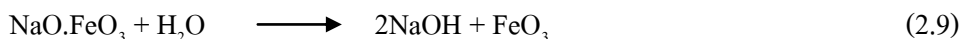


โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะระเหยตัวออก และไหลเข้าสู่ท่อเหล็กเย็นเพื่อกลั่น ซึ่งจะมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 92

การผลิตจากสารประกอบเฟอร์ไรต์

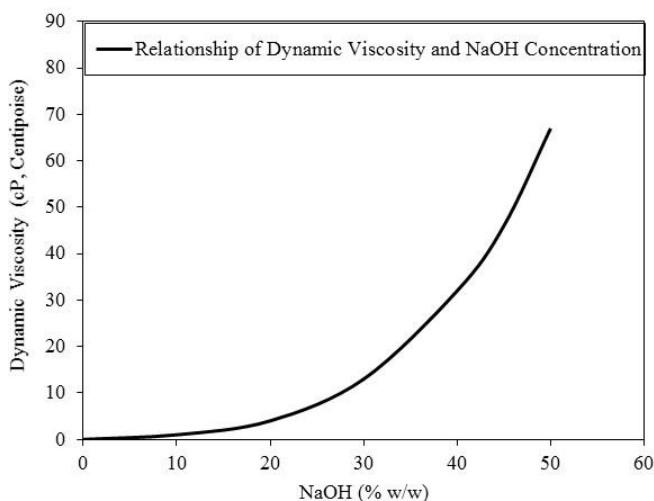
สารประกอบเฟอร์ไรต์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ NaO.FeO_3 จากการเตรียมด้วย สาร

ประกอบเฟอร์ไรท์กับผงโซดาที่อุณหภูมิ 1,100 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และเข้าสู่กระบวนการชะด้วยน้ำจนได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และตะกอนสารประกอบเฟอร์ไรท์ ดังสมการ 2.9



สมบัติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ทั่วไปเรียกว่า โซดาไฟ มีมวลของโมเลกุลเท่ากับ 40 และสำหรับร้อยละ 50 ของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีความหนืดพลวัตมีค่าเท่ากับ 78 cP (Centipoise) แต่สำหรับน้ำเปล่าจะมีค่าความหนืดพลวัตเท่ากับ 1.00 cP ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความสัมพันธ์ของความหนืดพลวัตจะเปลี่ยนตามความเข้มข้นของด่าง NaOH ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของความหนืดพลวัตกับความเข้มข้นของด่าง NaOH

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาวัสดุประสานที่ใช้เถ้านหินผสมในคอนกรีต เพื่อให้สามารถรับแรงได้ดีในช่วงต้น โดยปรับปรุงในส่วนของการใช้สารเร่งปฏิกิริยาปอชโซลานให้เกิดขึ้นเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งเป็นการศึกษาถึงการใส่ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นต่างกันในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหิน เพื่อมาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เพื่อเป็นฐานข้อมูลให้สามารถพัฒนาการใช้วัสดุปอชโซลานให้กว้างขวางมากขึ้น การศึกษาที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานทั้งสมบัติด้านความคงทนและสมบัติเชิงกล ซึ่งส่วนใหญ่พบว่า การปรับปรุงทางกายภาพของวัสดุปอชโซลานโดยการบดให้อ่อนนุ่มละเอียดมากขึ้น มีผลให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน

เกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งทำให้คอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานมีการพัฒนา กำลังอัดและสมบัติด้านความคงทนดีขึ้นด้วย เช่น วีรชาติ และคณะ (2546) พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จาก โรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ ส่วนการใช้ถ้า ปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงคือมีปริมาณข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นส่วนผสมมอร์ตาร์โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัด สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคประมาณ 7.3 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถให้กำลังอัดของ คอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยที่การแทนที่ ร้อยละ 30 ยังสามารถให้กำลังอัดได้ถึงร้อยละ 99 ที่ อายุ 90 วัน

Sata และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการเกิดปฏิกิริยาปอชโซ ลานในมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุชีวมวลบดละเอียดที่เป็น ถ้าแกลบเปลือกไม้ และถ้าปาล์มน้ำมัน โดยผล การศึกษาพบว่า ที่ระดับการแทนที่ถ้าชีวมวลที่เท่ากัน ระดับการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานเพิ่มขึ้นตาม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้น และการแทนที่ถ้าชีวมวลใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มากขึ้น

ส่วนสมบัติด้านความคงทน Chalee และ Jaturapitakkul (2008) ได้ศึกษาผลของความละเอียด ของถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า การใช้ถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ ดึกว่าถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการบด ตลอดจนถ้าถ่านหินที่บดละเอียดมีผลในการลดการแทรกซึมของคลอ ไรด์ในคอนกรีตที่มี W/B สูงมากกว่าคอนกรีตที่มี W/B ต่ำกว่า นอกจากนั้นในคอนกรีตที่ผสมถ้าชีวมวล ที่บดละเอียดสามารถป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดสนิมเหล็กได้เป็นอย่างดี โดย Chalee และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการ แทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี พบว่า การใช้ถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน ร้อยละ 35 ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง แต่การ แทนที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กมีแนวโน้มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติของวัสดุปอชโซลานโดยการบดให้ละเอียดก่อนนำมาใช้งาน ดังที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการปรับปรุงทางกายภาพเพื่อให้วัสดุปอชโซลานมีความละเอียดมากขึ้น ก็จะมี

พื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานมีความสมบูรณ์และให้กำลังอัดดี ส่วนการปรับปรุงทางเคมี โดยการใส่สารเร่งที่เป็นด่างในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลาน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตพบว่า มีฐานงานวิจัยน้อยมาก ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดย อุบลลักษณ์ และคณะ (2549) ได้ศึกษาการชะเถ้านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหิน พบว่าการชะละลายของเถ้านหินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการชะ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นปานกลางคือ 10 โมลาร์ และเวลาในการชะ 10 นาทีให้กำลังอัดที่สูง สามารถทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ให้กำลังอัดสูงถึง 65 เมกะปาสกาล ซึ่งเทียบได้กับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงมากเกินไป มีผลให้ความสามารถในการชะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากด่างที่มีความเข้มข้นสูงจะมีความหนืดและขัดขวางการชะเถ้านหิน

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ด่างในการกระตุ้นคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานมีค่อนข้างน้อย โดย B.M. Bahadure and N.S.Naik (2013) ที่มีการใช้ด่าง NaOH ที่มีความเข้มข้น 1, 2, 3, และ 4 โมลาร์ กระตุ้นกำลังระยะต้นในคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20, 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการวิจัยพบว่า การใช้ด่างกระตุ้นจะเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบในปริมาณที่มากขึ้น (แทนที่ 30%) โดยการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดระยะต้นสูงขึ้น ส่วนการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปริมาณที่น้อยลงกลับพบว่า การใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปมีผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง

Puertas et al. (2000) การศึกษาการเร่ง ปฏิกิริยาโดยใช้ NaOH กับเพสต์ที่ผสมระหว่างเถ้านหินและตะกรันเตาถลุงเหล็กปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา 2 และ 10 โมลาร์ ทำการบ่มในอุณหภูมิ 25 °ซ และ 65 °ซ และปริมาณ Fly ash/Slag (100/0, 70/30, 50/50, 30/70 และ 0/100) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ใช้เถ้านหินร้อยละ 50 และตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 กับการใช้สารเร่ง NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์ บ่มในอุณหภูมิ 25 °ซ จะมีการพัฒนากำลังอัดถึง 50 เมกะปาสกาล และมีแนวโน้มการใช้ปริมาณของ Slag เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะเพิ่มขึ้น และการพัฒนากำลังอัดขึ้นอยู่กับปริมาณของการใช้ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา NaOH และกำลังสูงก็ได้มาจากการใช้ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์

Paya et al. (2000) ได้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบที่มีด่างเร่งปฏิกิริยาเป็น NaOH ผลที่ได้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วันเพิ่มขึ้น เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่อายุเพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 7 วัน กลับ

พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ใส่สารเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าจุดไม่ติของการใช้สาร

Martinez R. and Palomo (2001) ได้ศึกษาการใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา พบว่าโครงสร้าง ออสัญฐาน (Amorphous structure) ของคอนกรีตได้เปลี่ยนแปลงไปเป็น โครงสร้างคล้าย โครงกระดูก (Skeletal structure) และการเกิดของเจลของพอลิเมอร์ (Geopolymeric gel) ขึ้นอยู่กับการใช้ปริมาณของด่างที่สูง เจลถูกผลิตเมื่อสารละลายของด่างเร่งที่มีความเข้มข้นสูง เริ่มทำปฏิกิริยากับ วัสดุตั้งต้น ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีสมบัติเชิงกลที่ดีในช่วงต้น ๆ ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Kejin et al. (2003) ได้ศึกษาผลของการบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่เป็น NaOH ในคอนกรีตที่ผสม Cement Kiln dust (CKD) ร้อยละ 50 และเถ้าถ่านหิน (FA) ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสาน ปริมาณของ NaOH ร้อยละ 0, 2 และ 5 บ่มที่อุณหภูมิ 24 °ซ, 38 °ซ และ 50 °ซ ผลการศึกษาพบว่า การบ่มที่อุณหภูมิ 38 °ซ แล้วใช้ปริมาณ NaOH ร้อยละ 2 ช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีต โดยสาร NaOH ได้ช่วยลดปริมาณของ Ettringite ที่อยู่ในเพสต์ CKD-FA ที่อายุต้นและปลาย เมื่อผสม NaOH มากขึ้น ปริมาณของ Ettringite ลดน้อยลงอย่างชัดเจน การใช้สาร NaOH ผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มกำลังของเพสต์ที่อายุต่าง ๆ แต่สำหรับการใช้ NaOH ร้อยละ 5 พบว่ากำลังเพิ่มขึ้นที่อายุเริ่มต้น เมื่อบ่มในอุณหภูมิ 24 °ซ หรือ 38 °ซ การศึกษาพบว่ากำลังอัดที่อายุ 56 วัน มีค่าเท่ากับ 27 เมกะปาสกาล ที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อ Cement Kiln dust (CKD) เท่ากับร้อยละ 50 และใช้ NaOH ร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 38 °ซ

Bahadure and Naik (2013) ได้ศึกษาความเหมาะสมของปริมาณเถ้าแกลบ ที่เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต เพื่อไปปรับปรุงกำลังอัด ระยะต้นโดยมีการใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีการใช้ปริมาณของเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และความเข้มข้นของ NaOH อยู่ที่ 1, 2, 3 และ 4 โมลาร์ ผลการศึกษาพบว่า

1. สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ไม่มีการใช้ NaOH กำลังอัดได้มีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของส่วนผสมควบคุมที่อายุ 7 และ 14 วัน เป็นเพราะปริมาณของเถ้าแกลบเข้าไปอุดช่องว่าง (Filler effect) หรือการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซ้ำ

2. สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 3, 7 และ 14 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเพิ่มขึ้น เพราะเป็นช่วงของการชะงักที่ออกมา หรือน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยามีปริมาณมากเกินไป

3. แต่สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 3 วัน จะพบว่ากำลังของคอนกรีต เพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 1 โมลาร์ เพราะว่าเป็นช่วงของปฏิกิริยาของปอซโซลานที่มีซิลิกา เป็นตัวทำปฏิกิริยา

4. สำหรับการแทนที่ถ้าแลกเปลี่ยนในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 ที่อายุ 3, 7 และ 14 วัน กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา NaOH ที่มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เพราะเป็นช่วงเวลาการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการใช้ต่างในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ส่วนการใช้ในการกระตุ้นคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานเพื่อให้สามารถรับแรงได้ดีในช่วงต้นพบว่า มีค่อนข้างน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการใช้ต่างในการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาคอนกรีตที่ผสมปอซโซลานให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

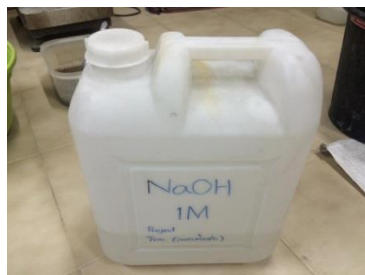
1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2555 (รูปที่ 3.1 (ก))
2. ฝ้าถ่านหิน ใช้ฝ้าถ่านหินลิกไนต์จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง (รูปที่ 3.1 (ข))
3. สารเร่งปฏิกิริยา สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 3.1 (ค))
4. ทราช ใช้ทราชแม่น้ำผ่านร่อนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (รูปที่ 3.1 (ง))
5. หิน ใช้หินขนาดใหญ่สุด 19 มม. (รูปที่ 3.1 (จ))
6. น้ำ ใช้น้ำสะอาด การศึกษานี้ใช้น้ำประปา



ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข. ฝ้าถ่านหิน



ค. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ง. ทราช



จ. หิน

รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ

1. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ (รูปที่ 3.2 (ก)) และขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³ (รูปที่ 3.2 (ข))
2. เครื่องทดสอบกำลังอัด ยี่ห้อ ELE ขนาด 300 ตัน (รูปที่ 3.2 (ค))
3. ชุดทดสอบการไหลมอร์ต้าร์ (รูปที่ 3.3 (ง)) และค่าการยุบตัวของคอนกรีต (รูปที่ 3.2 (จ))
4. เครื่องผสมคอนกรีต (รูปที่ 3.2 (ฉ))
5. ชุดทดสอบไวแคตทดสอบหาค่าขึ้นเหล็วปกติและหาการก่อตัว (รูปที่ 3.2 (ช))
6. อุปกรณ์ทดสอบความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหิน
7. กระบะผสมมอร์ต้าร์ (รูปที่ 3.2 (ง))



ก. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³



ข. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³



ก. เครื่องทดสอบกำลังอัด



ง. ชุดทดสอบการไหลของมอร์ตาร์



จ. การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต



ฉ. เครื่องผสมคอนกรีต



ช. ชุดทดสอบไวกัด



ซ. ชุดทดสอบความความถ่วงจำเพาะ



ญ. กระบะผสมมอร์ตาร์

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้มุ่งศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณการแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อสมบัติของวัสดุประสาน ที่ผสมเถ้านหินในปริมาณสูง โดยทำการศึกษาใน เพสต์ และมอร์ตาร์ โดยได้ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของ เพสต์ มอร์ตาร์ ที่ใช้เถ้านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ค่า (0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา

3.3.1 การทดสอบในเพสต์

การทดสอบความชันเหลวปกติ โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะที่ให้ค่าความชันเหลวปกติสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาการจมของเข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 มม. ในเวลา 30 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM C187 ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C305 โดยส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาในเพสต์ ได้ใช้เพสต์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเพสต์ที่ผสมเถ้านหิน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายตามมาตรฐาน ASTM C191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่ความชันเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่เข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. จมลงไปนในเพสต์ภายในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

3.3.2 การทดสอบในมอร์ตาร์

ส่วนผสมมอร์ตาร์

การศึกษานี้ใช้มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้านหินเป็นวัสดุประสาน โดยใช้เถ้านหิน (F) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วน ระหว่างวัสดุประสานและมวลรวมละเอียด เป็น 1 : 2.75 และใช้ปริมาณน้ำ ที่ให้ค่าการไหลของมอร์ตาร์อยู่ในช่วงมาตรฐาน (ร้อยละ 110 ± 5) แบ่งตัวอย่างทดสอบ เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่ได้ผสมสารเร่งปฏิกิริยา (กลุ่มควบคุมตารางที่

3.1) และผสมสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นต่างกันอีก 5 ค่า (ดังตารางที่ 3.2) และหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.³ ตามส่วนผสมในตารางที่ 3.1 และ 3.2 เพื่อทดสอบกำลังอัด ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุม

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			W/B	การไหลของมอร์ต้าร์ (%)
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย		
IF30	0.7	0.3	2.75	0.627	108.75
IF40	0.6	0.4	2.75	0.620	110.00
IF50	0.5	0.5	2.75	0.613	108.00
IF60	0.4	0.6	2.75	0.607	108.75

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ค่า NaOH เร่งปฏิกิริยา

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			W/B	การไหลของมอร์ต้าร์ (%)
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย		
IF30 - 0.25 M	0.7	0.3	2.75	0.593	106.25
IF30 - 0.50 M	0.7	0.3	2.75	0.583	108.75
IF30 - 0.75 M	0.7	0.3	2.75	0.587	107.50
IF30 - 1.00 M	0.7	0.3	2.75	0.600	106.75
IF40 - 0.25 M	0.6	0.4	2.75	0.583	105.75
IF40 - 0.50 M	0.6	0.4	2.75	0.577	106.75
IF40 - 0.75 M	0.6	0.4	2.75	0.580	110.00
IF40 - 1.00 M	0.6	0.4	2.75	0.590	107.50
IF40 - 1.25 M	0.6	0.4	2.75	0.603	107.50

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			W/B	การไหลของมอร์ตาร์ (%)
	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย		
IF50 - 0.25 M	0.5	0.5	2.75	0.580	107.25
IF50 - 0.50 M	0.5	0.5	2.75	0.567	105.50
IF50 - 0.75 M	0.5	0.5	2.75	0.573	109.50
IF50 - 1.00 M	0.5	0.5	2.75	0.583	108.75
IF50 - 1.25 M	0.5	0.5	2.75	0.597	110.00
IF60 - 0.25 M	0.4	0.6	2.75	0.570	108.33
IF60 - 0.50 M	0.4	0.6	2.75	0.557	105.25
IF60 - 0.75 M	0.4	0.6	2.75	0.563	109.25
IF60 - 1.00 M	0.4	0.6	2.75	0.577	110.50
IF60 - 1.25 M	0.4	0.6	2.75	0.590	108.00
หมายเหตุ: "I"	หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน				
"F"	หมายถึง เถ้าถ่านหิน				
"0.25M ถึง 1.25M "	หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 โมลาร์ ตามลำดับ				
"30, 40, 50, 60"	หมายถึง มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50, และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ				
ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์					
"I"	หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน				
"IF40"	หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน				
"IF40 - 0.50M"	หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และผสมสาร NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์				

การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์

ตามสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 จึงได้ปริมาณของวัสดุต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการผสมมอร์ตาร์ทั้งหมด 24 ส่วนผสม เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้หล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่มในน้ำ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ในการทดสอบกำลังอัดแต่ละอายุการบ่มได้ใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างทดสอบ โดยทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.³ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเป็น 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณของเหลว ที่ให้ค่าการไหลมาตรฐานในช่วงร้อยละ 110±5 หล่อมอร์ตาร์ และทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไป บ่มในน้ำจนถึงอายุทดสอบกำลังอัด

การทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์

การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C230 เพื่อหาปริมาณน้ำที่ ให้ค่าการไหลมาตรฐานในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ทำความสะอาดผิวหน้าของโต๊ะการไหลให้สะอาดและแห้ง จากนั้นวางแบบทดสอบการไหลลงตรงกลางของโต๊ะการไหล
- 2) ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบทดสอบการไหลให้มีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 20 ครั้งให้ทั่วตลอดหน้าตัด
- 3) ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบชั้นที่ 2 ซึ่งมีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งมอร์ตาร์อีก 20 ครั้ง สำหรับการใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ให้มีความสูงกว่าแบบเล็กน้อยเพื่อทำการปาดหน้าให้ เท่ากัน อย่างสม่ำเสมอ
- 4) ภายหลังกะทุ้งเสร็จเรียบร้อยแล้วใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้า และปาดมอร์ตาร์ ส่วนที่เกินออกทิ้งไป
- 5) หากมีน้ำไหลออกมาได้ฐานของแบบให้เช็ดน้ำออก และนำมอร์ตาร์ที่ตกข้าง แบบออกให้หมด
- 6) ยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างช้า ๆ ซึ่งเวลาที่ใช้ตั้งแต่ใส่ มอร์ตาร์ลงแบบจนถึงเวลาที่ยกแบบออกจากผิวหน้าโต๊ะการไหลประมาณ 1 นาที
- 7) ภายหลังจากการยกแบบออกจากมอร์ตาร์ให้ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ซึ่งจะยกงานของโต๊ะการไหลสูง 13 มม. และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบ ในเวลา 15 วินาที ในขณะที่ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหลให้ยึดโต๊ะการไหลให้แน่น อย่าให้มี การเคลื่อนตัวเพราะจะทำให้ค่าการไหลที่ทดสอบผิดพลาด

8) มอร์ตาร์ดที่อยู่บนงานของโตะการไหลจะแผ่ออกไป โดยเกือบเป็นวงกลม ให้ใช้เวอร์เนียหรือเทปวัด เส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ดจำนวน 4 ครั้ง ตรงตำแหน่งซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา (หรือวัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนงานของโตะการไหล)

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

D_1, D_2, D_3 และ D_4 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางการตกกระทบ (หน่วยเป็น มม.)

$$D_{\text{average}} = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}{4} \text{ เป็นค่าเฉลี่ยของการไหลแผ่}$$

$$D_0 = 100 \text{ มม.}$$

ค่าที่ได้ต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5

การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ดสำหรับทดสอบกำลังอัด

การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ดในการทดสอบกำลังอัด ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ดขนาด

$50 \times 50 \times 50 \text{ มม.}^3$ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ผสมมอร์ตาร์ดตามส่วนผสมที่กำหนดโดยทำการผสมสารละลาย NaOH กับเถ้าถ่านหิน และทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้เกิดการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน (รูปที่ 3.3 (ก))

2) ใส่มอร์ตาร์ดทั้งหมดลงในแบบหล่อ โดยใช้เวลาในการเทลงแบบไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที ภายหลังจากการผสมมอร์ตาร์ดเสร็จสิ้น เพื่อลดปัญหาการระเหยของน้ำออกจากส่วนผสม (รูปที่ 3.3 (ข)) บรรจุมอร์ตาร์ดใส่แบบหล่อชั้นแรก โดยมีความหนาประมาณ 25 มม. ซึ่งเป็นความหนา ครั้งหนึ่งของตัวอย่างมอร์ตาร์ด กระทุ้งมอร์ตาร์ดด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบ ๆ ละ 8 ครั้ง แต่ละรอบการกระทุ้งจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จ ทุกตัวอย่างแล้วจึงใส่มอร์ตาร์ดชั้นที่ 2 ซึ่งมีความหนาประมาณ 25 มม. จากนั้นทำการกระทุ้งมอร์ตาร์ดแต่ละตัวอย่างจำนวน 4 รอบ รอบละ 32 ครั้ง เช่นเดียวกับกรณีของชั้นแรก (ดังนั้นแต่ละตัวอย่างจึงมีการกระทุ้ง 64 ครั้ง) ในแต่ละรอบของการกระทุ้งครั้งที่ 2 อาจมีมอร์ตาร์ดล้นออกมานอกขอบของแบบหล่อ ดังนั้นเมื่อเสร็จการกระทุ้งแต่ละรอบ ให้ดันมอร์ตาร์ดที่ล้นออกมาเข้าไปอยู่ในแบบ เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งแล้วมอร์ตาร์ดควรมีความสูงกว่าขอบด้านบนของแบบเล็กน้อย ใช้เกรียงปาดผิวหน้าของมอร์ตาร์ดให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อ (รูปที่ 3.3 (ค))ทำการถอดแบบมอร์ตาร์ดหลังหล่อแบบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำไปบ่มในน้ำต่อเนื่อง จนถึงอายุทดสอบ (รูปที่ 3.3 (ง))



ก. การผสมมอร์ตาร์



ข. การหล่อมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อ



ค. การกระทุ้งมอร์ตาร์ในแบบหล่อ



ง. การถอดแบบมอร์ต้าร์หลังหล่อ 24 ชั่วโมงและนำไปบ่มในน้ำต่อเนื่องจนถึงอายุทดสอบ

รูปที่ 3.3 การหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์สำหรับทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัด

1) การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ตามอายุการบ่มที่กำหนด ได้แก่ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนของอายุของมอร์ต้าร์ อายุมอร์ต้าร์ไม่เกินตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.3

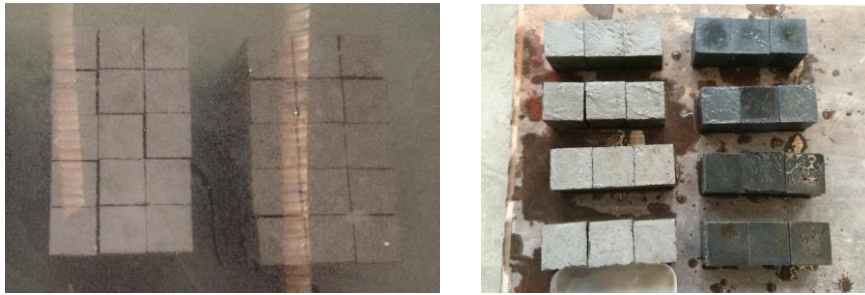
ตารางที่ 3.3 อายุของมอร์ต้าร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ

อายุที่ทดสอบ	เวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ
24 ชั่วโมง	± 30 นาที
3 วัน	± 1 ชั่วโมง
7 วัน	± 3 ชั่วโมง
14 วัน	± 6 ชั่วโมง
28 วัน	± 12 ชั่วโมง

2) หลังจากบ่มตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.³ ในน้ำประปาต่อเนื่องจนถึงช่วงอายุทดสอบ นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ทำการเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้แห้ง เพื่อขจัด น้ำและเม็ดทราย หรือสิ่งที่เกาะผิวมอร์ต้าร์ออก และทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่อง ทดสอบเลือกด้านเรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน เพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ หากด้าน ที่เลือก เพื่อทำการทดสอบไม่เรียบพอจะส่งผลต่อการลดกำลังของมอร์ต้าร์อย่างมาก (รูปที่ 3.4)

3) ทดสอบการรับน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยวางตัวอย่างมอร์ต้าร์บนเครื่อง ทดสอบให้ตรงศูนย์กลางเครื่อง (รูปที่ 3.5)

4) ให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยอัตราคงที่ประมาณ 90-180 กิโลกรัมต่อวินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์



รูปที่ 3.5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์



รูปที่ 3.6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างมอร์ต้าร์

บทที่ 4

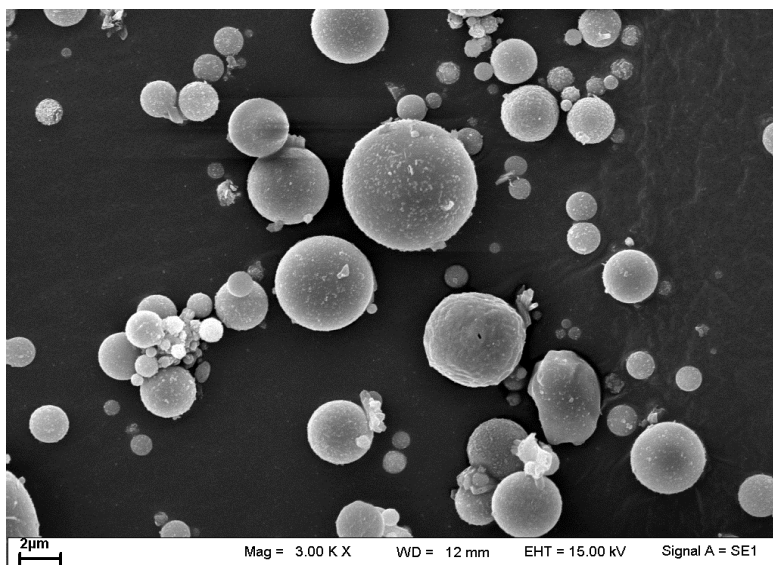
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 สมบัติของวัสดุ

4.1.1 วัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพ

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเถ้าถ่านหิน ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และความละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนักซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 และภาพขยายของเถ้าถ่านหินได้แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพขยายของเถ้าถ่านหินแม่เมาะชนิด F โดยใช้เครื่อง SEM ปี 2558

สมบัติทางเคมี

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.2 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon Dioxide, SiO ₂	20.10	35.20
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	5.20	19.20
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	3.15	17.81
Calcium Oxide, CaO	60.24	16.65
Magnesium Oxide, MgO	1.13	-
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.11	0.63
Potassium Oxide, K ₂ O	0.43	2.44
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.42	1.50
LOI.	2.03	0.15

4.1.2 สมบัติของมวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.65 ร้อย
 ละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.70 และ โมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.67

4.1.3 ค่าแรงปฏิกิริยา

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

4.2 สมบัติของเพสต์

4.2.1 ความต้องการน้ำของเพสต์ที่ให้ความชื้นเหลวปกติ

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลวปกติของเพสต์มีความสำคัญต่อการเตรียมตัวอย่าง
 เพสต์เพื่อทดสอบสมบัติอื่น ๆ เช่น ระยะเวลาก่อตัวต้น ระยะเวลาก่อตัวปลาย ที่ต้องเตรียมตัวอย่าง
 ทดสอบให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ การทดสอบความชื้นเหลวปกติได้ใช้มาตรฐาน ASTM C 187 และ
 ชุดทดสอบไวแคต (Vicat apparatus) ที่มีเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.หนัก 300 กรัม ตกลงอย่าง

อิสระเป็นเวลา 30 วินาที และเข็มจมไปในเพสต์เป็นความลึกเท่ากับ 10 มม. ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลวปกติของเพสต์แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความชื้นเหลวปกติ เวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้าย

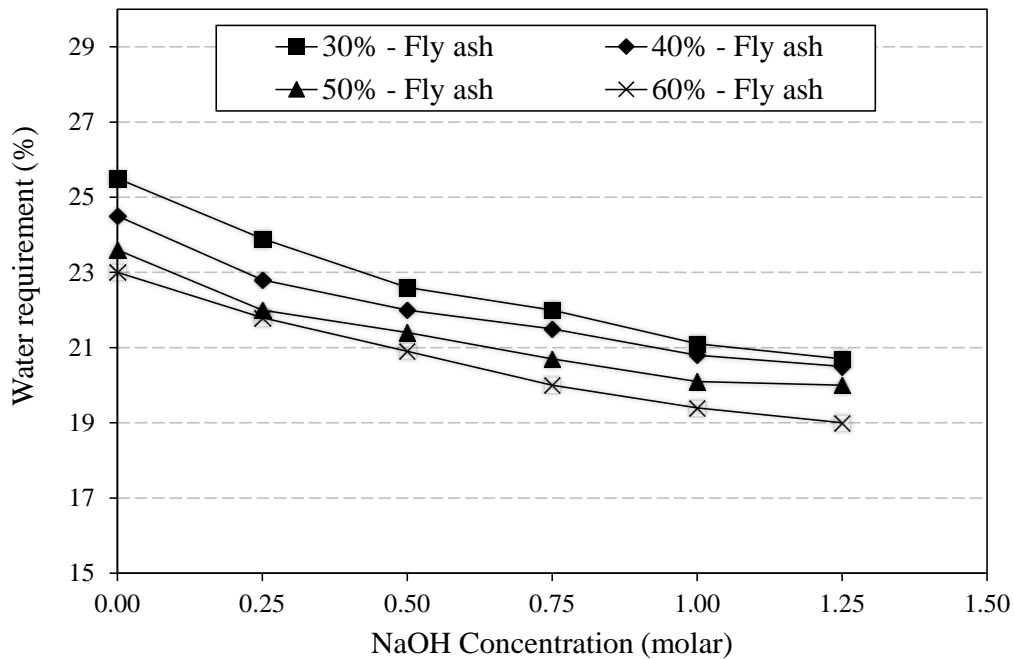
ส่วนผสม	ความชื้นเหลวปกติ (ร้อยละ)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
IF30	25.50	110	200
IF30 - 0.25M	23.90	55	125
IF30 - 0.50M	22.60	65	140
IF30 - 0.75M	22.00	70	155
IF30 - 1.00M	21.10	75	170
IF30 - 1.25M	20.70	90	180
IF40	24.50	125	235
IF40 - 0.25M	22.80	70	130
IF40 - 0.50M	22.00	85	145
IF40 - 0.75M	21.50	90	165
IF40 - 1.00M	20.80	100	190
IF40 - 1.25M	20.50	105	215
IF50	23.60	135	255
IF50 - 0.25M	22.00	85	140
IF50 - 0.50M	21.40	90	150
IF50 - 0.75M	20.70	100	175
IF50 - 1.00M	20.10	120	200

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ส่วนผสม	ความเข้มข้นเหลวปกติ (ร้อยละ)	การก่อดัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อดัวสุดท้าย (นาที)
IF50 - 1.25M	20.00	125	225
IF60	23.00	140	275
IF60 - 0.25M	21.80	95	155
IF60 - 0.50M	20.90	100	175
IF60 - 0.75M	20.00	110	185
IF60 - 1.00M	19.40	125	215
IF60 - 1.25M	19.00	130	245

4.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อปริมาณน้ำของเพสต์

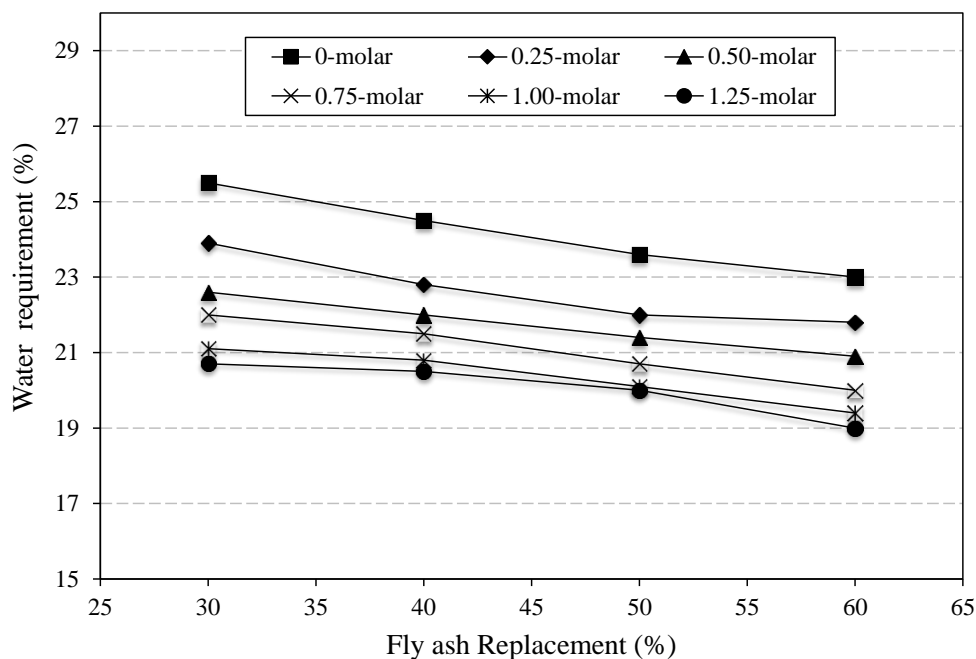
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายที่ใช้ในการผสมเพสต์ที่ความเข้มข้นต่างกัน เพื่อให้ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลวปกติ พิจารณาตามรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายของ NaOH เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของเพสต์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในทุกส่วนผสม เนื่องจากว่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ค่อนข้างต่ำ ทำให้เพสต์ลื่นไหล (Sodium Hydroxide-NaOH, 2011) จึงทำให้ความต้องการน้ำที่ให้ความชื้นเหลวปกติมีแนวโน้มลดลง เช่น ปริมาณแก้ว่านหินเท่ากับร้อยละ 30 และใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติมีค่าเท่ากับร้อยละ 25.50, 23.90, 22.60, 22.00, 21.10 และ 20.70 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อความต้องการน้ำของเพสต์

4.2.3 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อความต้องการน้ำของเพสต์ที่ทำให้ความชื้นเหลือปกติ

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อความต้องการน้ำที่ทำให้ความชื้นเหลือปกติของเพสต์ดังรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อปริมาณของเถ้าถ่านหินที่ผสมในเพสต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของเพสต์ลดลง เป็นเพราะเถ้าถ่านหินที่กลมและผิวเรียบทำให้เพสต์ผสมเข้ากันได้และมีการไหลลื่นได้ดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องการให้ได้รับความชื้นเหลือปกติมีแนวโน้มลดลง (ชिरทรัพย์ รัตชนภาส, 2545 และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) จากรูปที่ 4.3 เป็นที่น่าสังเกตว่ากลุ่มที่ผสมสารละลาย NaOH เพื่อเร่งปฏิกิริยามีผลให้การให้เถ้าถ่านหินปริมาณมากขึ้นมีความต้องการน้ำลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมสาร NaOH ทั้งนี้เนื่องจากสารละลาย NaOH มีสมบัติที่ทำให้เกิดการลื่นไหลคืออยู่แล้ว ดังที่กล่าวมาข้างต้น ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหิน การลื่นไหลที่เกิดขึ้นก็ไม่มากเท่ากับกลุ่มควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duo et al. (2016) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณของเถ้าถ่านหินสูงขึ้น จะทำให้ความต้องการน้ำที่ให้เพสต์อยู่ในความชื้นเหลือปกติมีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณของเถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 10 และ 40 จะมีความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 24.8 ไปเป็นร้อยละ 24.0 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อความต้องการน้ำของเพสต์

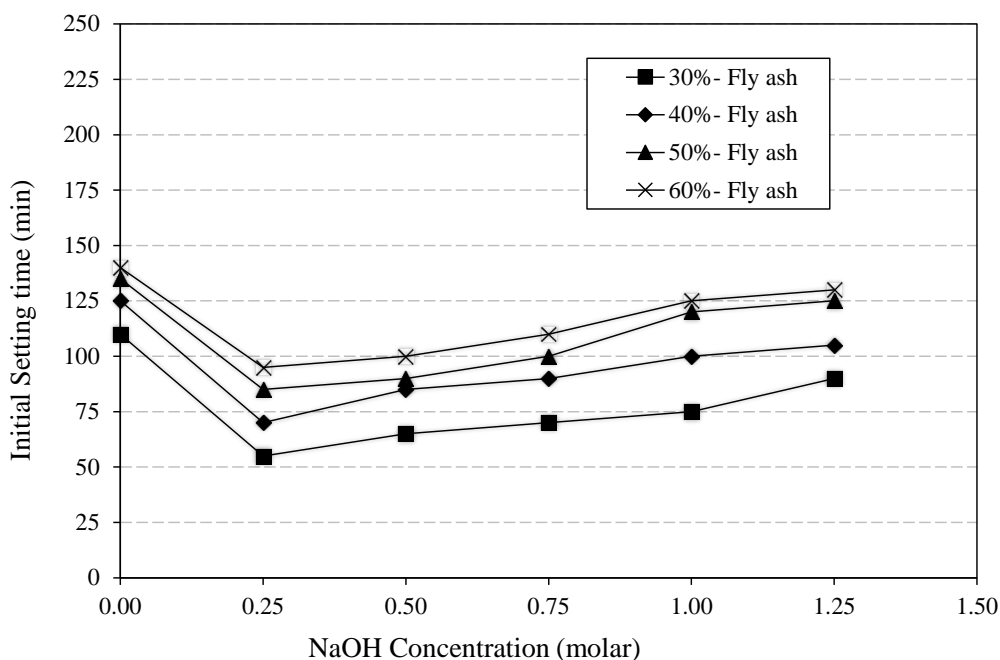
4.2.4 การก่อตัวของเพสต์

ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการก่อตัวของเพสต์

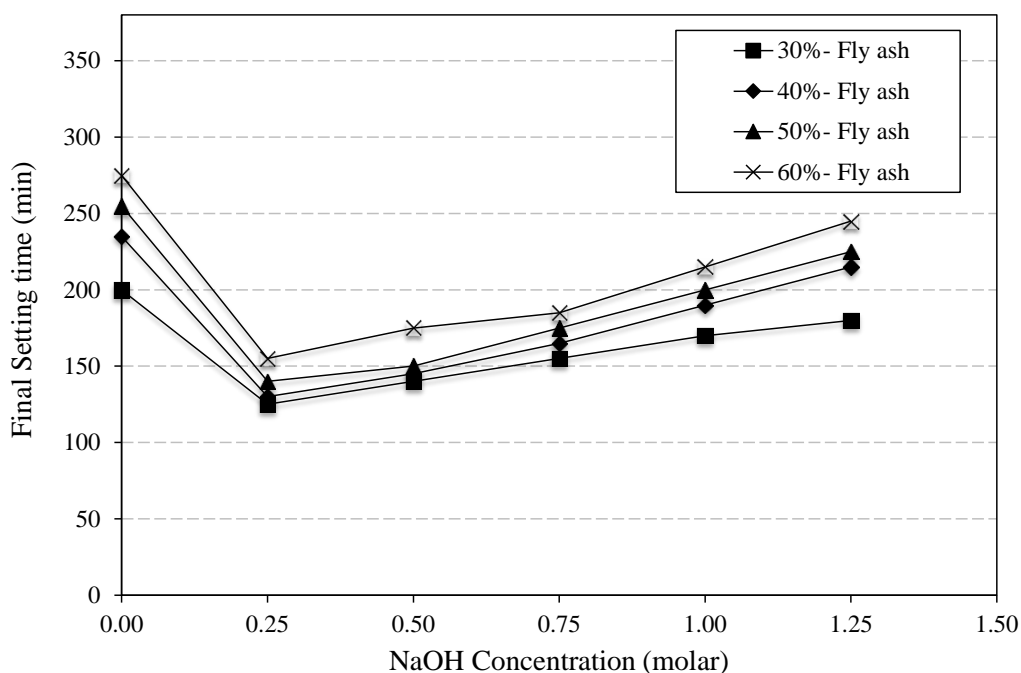
รูปแบบของผลการทดสอบของการก่อตัวของเพสต์ทุก ๆ ส่วนผสม แสดงดังในรูปที่ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข) ที่แสดงถึงผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและปลาย ส่วนรายละเอียดของผลของการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเห็นว่า เวลาที่เร็วที่สุดของการก่อตัวของเพสต์เทียบกับทุกส่วนผสมมีค่าประมาณ 55 นาที เป็นเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของส่วนผสมที่ใช้เถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 30 และมีการใช้ต่าง NaOH ความเข้มข้นเท่ากับ 0.25 โมลาร์ และการก่อตัวของเพสต์ของส่วนผสมที่ใช้ต่าง NaOH ที่ใช้เวลานานที่สุดถึง 130 นาที ที่เป็นเวลาการก่อตัวระยะต้นของส่วนผสมที่ได้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1.25 โมลาร์ และใช้เถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 60

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายในกลุ่มที่ใช้ต่าง NaOH กระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข) ตามลำดับ พบว่า การใช้ NaOH มีความเข้มข้นสูงขึ้นมีแนวโน้มให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น แต่อย่างน้อยกว่ากลุ่มควบคุม ระยะเวลาการก่อตัวของกลุ่มที่ใช้ต่าง NaOH แรงปฏิกิริยาเร็วกว่ากลุ่มควบคุม อาจเกิดจากสารประกอบของซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อผสมสารละลายของต่าง NaOH ที่มีผลต่อการก่อตัวของเพสต์ เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิวและสารละลายจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ

แคลเซียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้มากขึ้น จึงเป็นผลให้มีการก่อตัวต้นเร็วขึ้น โดยในช่วงของการก่อตัวเร็วที่สุดอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.75 โมลาร์ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pradip N. and Prabir K.S. (2015) และงานวิจัยของ Sakonwan H. et al. (2014) ที่ระบุว่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายจะนานขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ NaOH เพิ่มขึ้น และสามารถสังเกตจากรูปที่ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข) ตามลำดับ สำหรับส่วนผสมที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 และการใช้สารละลายต่าง NaOH เท่ากับ 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ การก่อตัวระยะต้นมีค่ากับ 135, 85, 90, 100, 120, 125 และ 170 นาที และการก่อตัวระยะปลายจะมีค่ากับ 255, 140, 150, 175, 200 และ 225 นาที ตามลำดับ



ก. การก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์

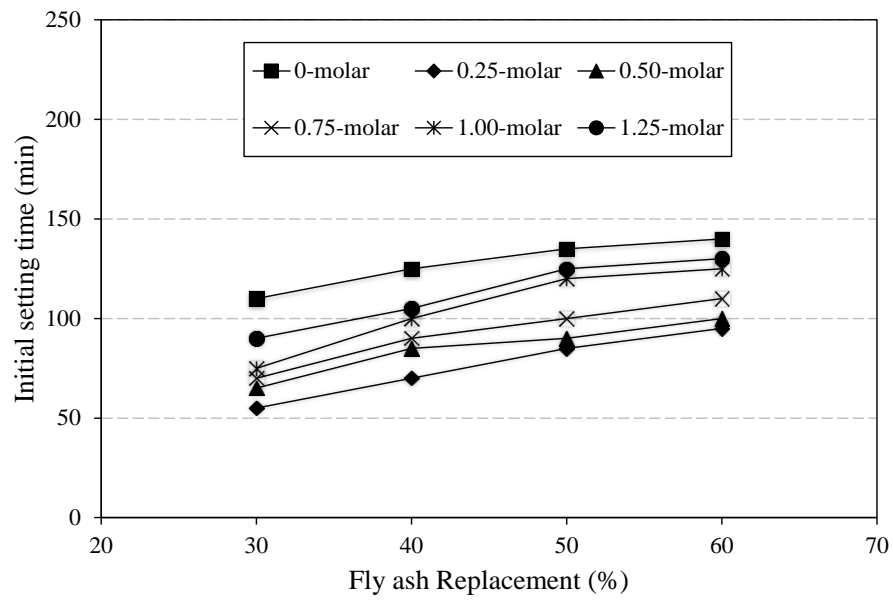


ข. การก่อตัวสุดท้ายของเพสต์

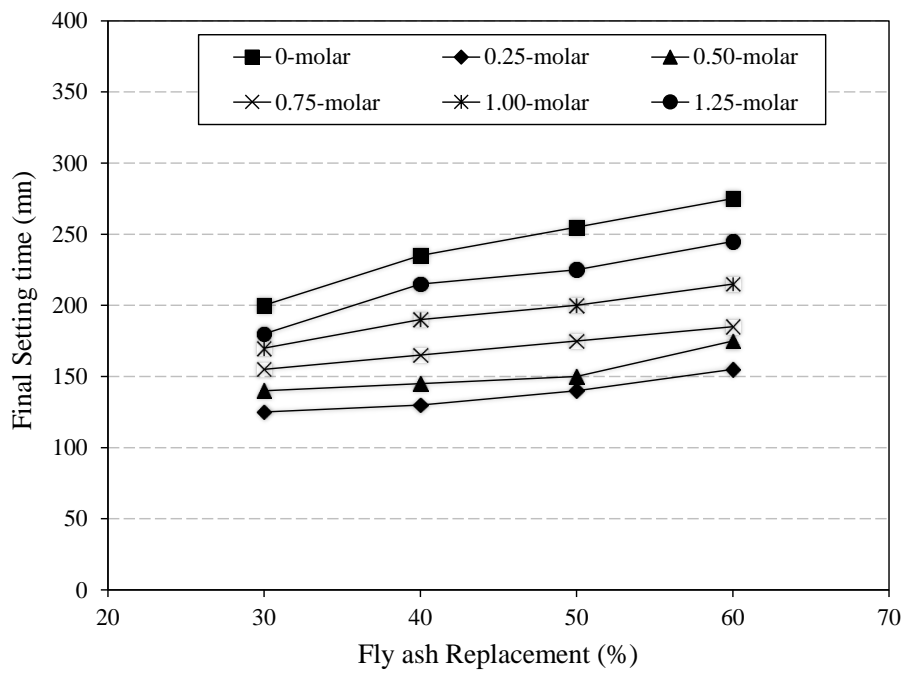
รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการก่อตัวของเพสต์

ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการก่อตัวของเพสต์

ผลการทดสอบหาค่าการก่อตัวของเพสต์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และพิจารณาผลของปริมาณเถ้าถ่านหินดังรูปที่ 4.5 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นในส่วนผสมส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของเพสต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยให้ผลในทิศทางเดียวกันในทุกส่วนผสม ทั้งนี้เป็นผลจากการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ระยะเวลาการก่อตัวต้นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ มากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลงจึงมีผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย การก่อตัวในระยะต้นจึงใช้เวลานานขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา(ธีรทรัพย์ รัตชนภาส, 2545; ปริญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร, 2528; Jaturapitakkul C. et al., 1999; Owens PL., 1979) เช่น ที่ปริมาณของค่า NaOH เท่ากับ 0.25 โมลาร์ และใช้เถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 55, 70, 85 และ 95 นาที และระยะปลายเท่ากับ 125, 130, 140 และ 155 นาที ตามลำดับ



ก. การก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์



ข. การก่อตัวระยะปลายของเพสต์

รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการก่อตัวของเพสต์

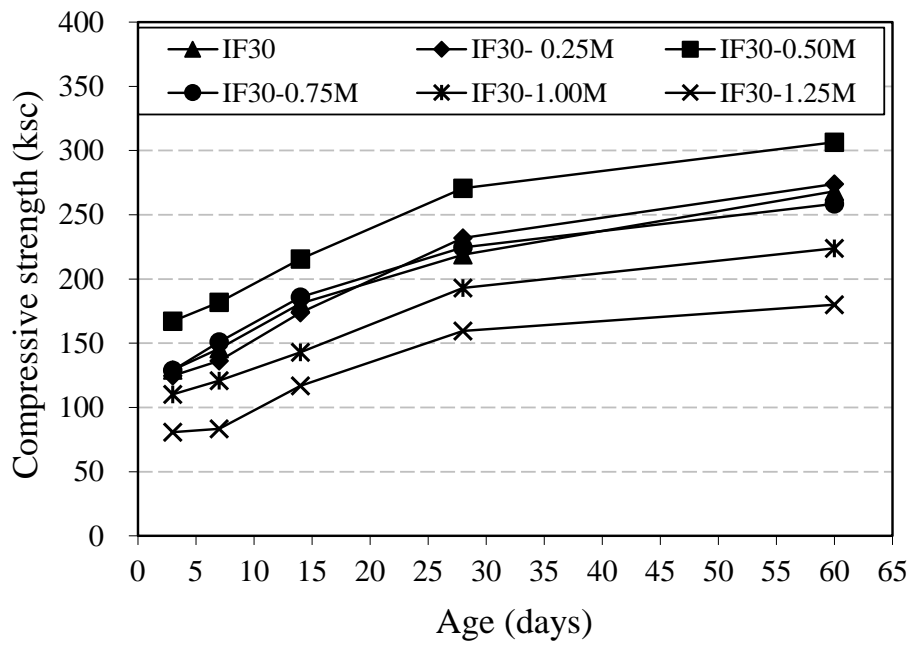
4.3 สมบัติของมอร์ตาร์

4.3.1 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

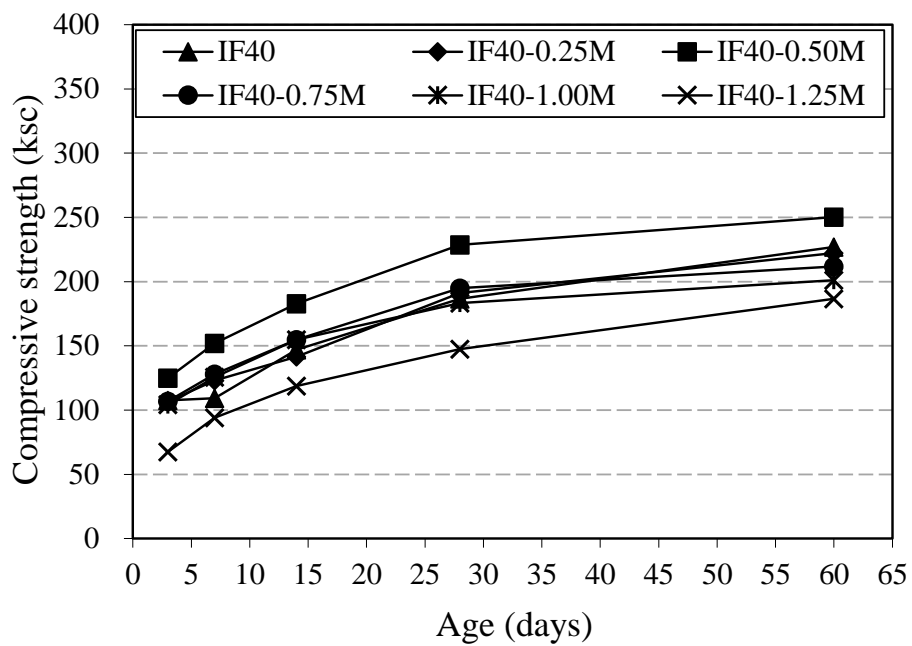
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงในตาราง 4.3 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดดังรูปที่ 4.6 พบว่า การใช้เถ้านหินและค้างเร่งปฏิกิริยาสามารถให้มอร์ตาร์มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้นในทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลดีต่อการรับแรงเชิงกล โดยสังเกตได้จากค่าการพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วันแรกมีแนวโน้มสูงกว่าช่วง 28 วันถึง 60 วัน ทั้งนี้เนื่องจาก ในช่วงอายุต้นของการบ่ม กำลังอัดของมอร์ตาร์จะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำเป็นหลัก จึงมีผลทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้นเป็นไปตามหลักคอนกรีตเทคโนโลยีโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ พบว่า ไม่เห็นความแตกต่าง (สังเกตจากความชันของกราฟใกล้เคียงกัน) ทั้งนี้อาจเกิดจากการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ซึ่งการใช้ NaOH เร่งปฏิกิริยาจะมีผลกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง เมื่อพิจารณาผลของเถ้านหินต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ เทียบกับอายุ 3 วัน พบว่า การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนหลังอายุ 7 วันเป็นต้นไป เช่น มอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 3 วันเท่ากับ 170, 173, 198 และ 201 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจาก กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วง 7 วัน เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งส่งผลให้มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้านหินที่มากขึ้น ประกอบกับที่อายุ 3 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ในกลุ่มที่ผสมเถ้านหินในปริมาณสูงขึ้น มีค่าต่ำจึงทำให้ร้อยละของอายุปลายต่ออายุต้นมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์เทียบกับอายุ 3 วัน

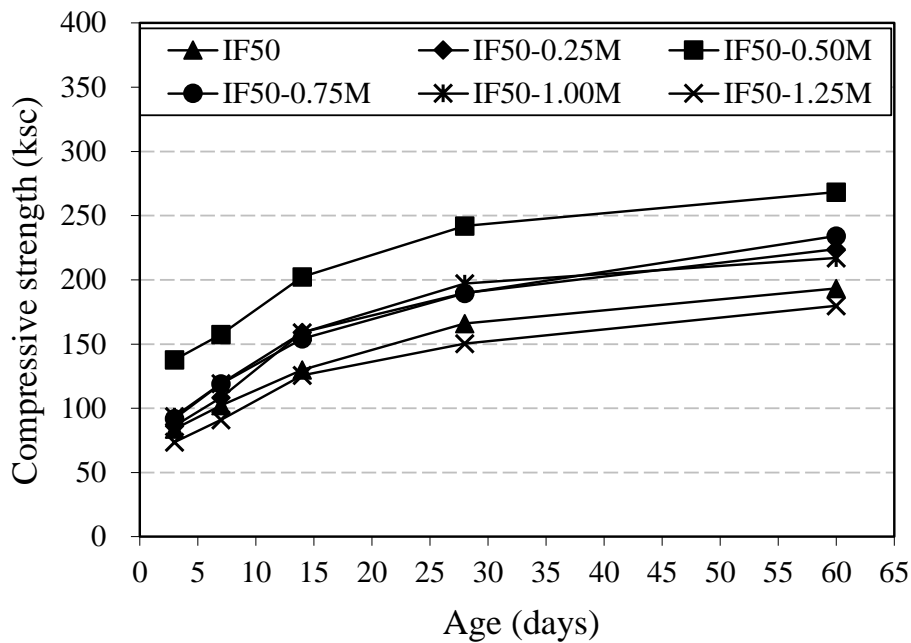
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ^๒) - ร้อยละกำลังอัดเทียบกับอายุ 3 วัน				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
IF 30	129 - 100	146 - 113	181 - 140	219 - 170	268 - 208
IF30 - 0.25M	125 - 100	136 - 109	174 - 139	232 - 186	274 - 219
IF30 - 0.50M	167 - 100	182 - 109	216 - 129	271 - 162	306 - 183
IF30 - 0.75M	129 - 100	151 - 117	186 - 144	225 - 174	259 - 201
IF30 - 1.00M	110 - 100	121 - 110	143 - 130	193 - 175	224 - 204
IF30 - 1.25M	81 - 100	83 - 102	117 - 144	160 - 198	180 - 222
IF 40	108 - 100	109 - 101	147 - 136	187 - 173	227 - 210
IF40 - 0.25M	107 - 100	123 - 115	141 - 132	191 - 179	222 - 207
IF40 - 0.50M	125 - 100	152 - 122	183 - 146	229 - 183	250 - 200
IF40 - 0.75M	107 - 100	128 - 120	155 - 145	195 - 183	212 - 198
IF40 - 1.00M	104 - 100	126 - 121	155 - 149	183 - 176	201 - 193
IF40 - 1.25M	67 - 100	94 - 140	119 - 178	147 - 219	187 - 279
IF 50	84 - 100	102 - 121	130 - 155	166 - 198	193 - 230
IF50 - 0.25M	86 - 100	108 - 126	159 - 185	190 - 221	224 - 260
IF50 - 0.50M	138 - 100	158 - 114	202 - 146	242 - 175	268 - 194
IF50 - 0.75M	92 - 100	119 - 129	154 - 167	190 - 207	234 - 254
IF50 - 1.00M	94 - 100	119 - 127	159 - 169	197 - 210	217 - 231
IF50 - 1.25M	74 - 100	91 - 123	126 - 170	150 - 203	180 - 243
IF 60	74 - 100	83 - 112	104 - 141	149 - 201	162 - 219
IF60 - 0.25M	78 - 100	104 - 133	131 - 168	159 - 204	179 - 229
IF60 - 0.50M	94 - 100	135 - 144	159 - 169	180 - 191	196 - 209
IF60 - 0.75M	81 - 100	126 - 156	136 - 168	185 - 228	219 - 270
IF60 - 1.00M	64 - 100	100 - 156	124 - 194	153 - 239	200 - 313
IF60 - 1.25M	57 - 100	84 - 147	110 - 193	130 - 228	152 - 267



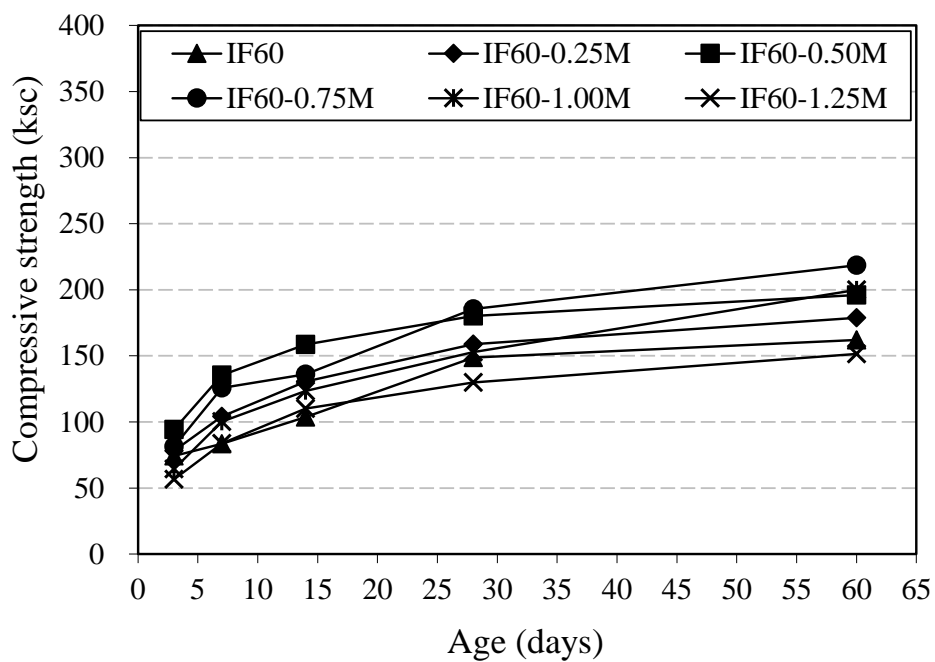
ก. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30



ข. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40



ก. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50



ง. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60

รูปที่ 4.6 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุบ่มของมอร์ต้าร์

4.3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH ในการเร่งปฏิกิริยา ดังตารางที่ 4.4 และพิจารณาที่อายุการบ่มช่วงต้น (3 วัน) ดังรูปที่ 4.7 (ก) พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่ของเถ้าถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น

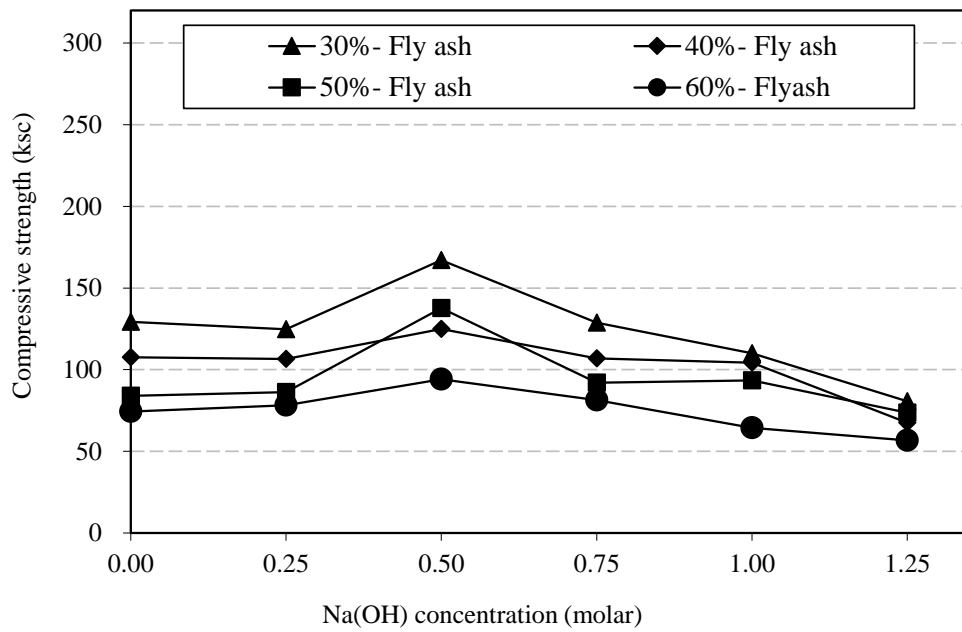
เท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH โดยแนวโน้มดังกล่าวเห็นชัดเจนมากขึ้น เมื่ออายุของมอร์ต้าร์ถึง 28 วัน ดังรูปที่ 4.7 (ง) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกจากเม็ด่านหิน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Jonh N. and Ban Seng C., 2003; Bahadure B.M. and Naik N.S., 2013) เช่น กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเม็ด่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 166, 190, 242, 190, 197 และ 150 กก./ซม.² ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการทดสอบ เช่น กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเม็ด่านหินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 187, 191, 229, 195, 183 และ 147 กก./ซม.² ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดมอร์ต้าร์ เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นมากกว่า 0.50 โมลาร์ อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเม็ด่านหิน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจอความชื้น จะทำให้มีความลื่นมากขึ้น และส่งผลให้แรงยึดเกาะภายในซีเมนต์เพสต์ต่ำลง ส่งผลให้กำลังของมอร์ต้าร์ลดลง (Sodium Hydroxide-NaOH, 2011) ได้ อีกอย่างเมื่อใช้ปริมาณของด่างที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณของพูนในมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์อย่างแน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Risdanareni P. et al. (2015) ที่แสดงถึงการทดสอบความพูนของตัวอย่างที่ใช้ด่างที่สูงถึง 10 M จะมีปริมาณพูนที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ด่างเท่ากับ 8M อย่างไรก็ตาม ที่อายุมอร์ต้าร์นานขึ้นเป็น 28 วัน พบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ และผสมเม็ด่านหินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นเริ่มมีผลต่อการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ส่งผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดมากขึ้น การใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาในมอร์ต้าร์ที่ผสมเม็ด่านหินในปริมาณสูงในครั้งนี้ พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่เม็ด่านหินและใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.75 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน สูงกว่ากลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ใช้เม็ด่านหินในปริมาณสูง (ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นถึง 1.00 โมลาร์ มีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม เช่น มอร์ต้าร์ควบคุมที่ผสมเม็ด่านหินร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 166 และ 149 กก./ซม.² ตามลำดับ และเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 โมลาร์ เร่งปฏิกิริยาในมอร์ต้าร์ดังกล่าว ได้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 190, 242, 190, 197 และ 159 180 185 153 กก./ซม.² ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็น

เห็นว่า การใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ให้ผลที่ดีขึ้นในมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้านหินในปริมาณสูง และเริ่มเห็นผลชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุบ่มนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นในช่วงหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon CS. et al. (2003) ส่วนการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.25 โมลาร์ พบว่า ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมในทุกส่วนผสม และทุกอายุการบ่ม จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นด่างเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

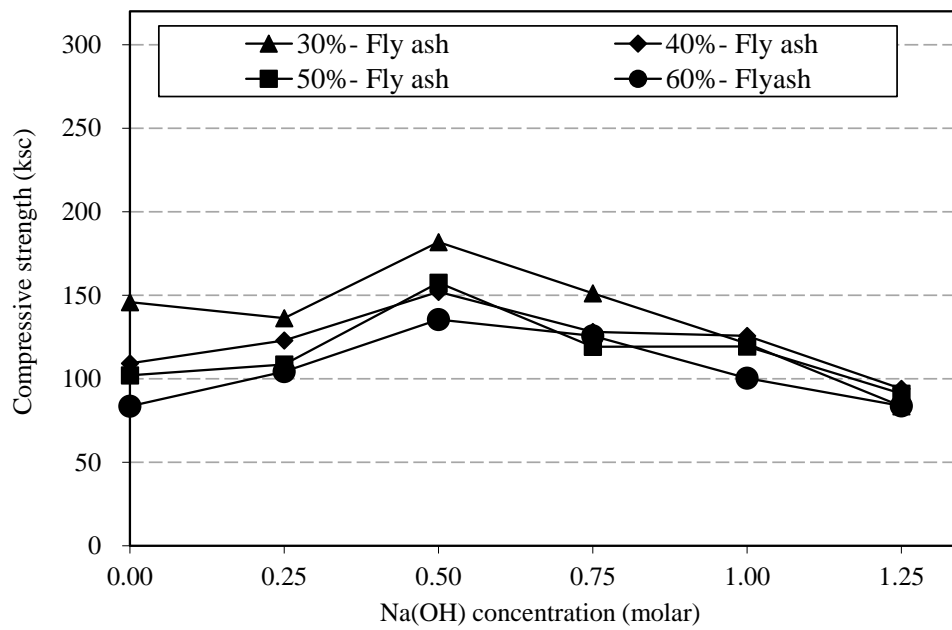
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ในรูปของร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม (Normalized compressive strength) ของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 4.8 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการแทนที่ด้วยเถ้านหิน มีค่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงกว่า 0.50 โมลาร์ ซึ่งการใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้านหินผสมในมอร์ตาร์ร้อยละ 50 โดยวัสดุประสาน ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด โดยทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุมได้เกือบถึง ร้อยละ 50 (ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมเท่ากับ 146) ส่วนในกลุ่มที่ใช้เถ้านหินในปริมาณสูงถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า การใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.75 โมลาร์ ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด (ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมเท่ากับ 125) โดยสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.50 โมลาร์ (ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมเท่ากับ 121) เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณเถ้านหินที่มากขึ้น การใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาให้เข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น ส่วนการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.25 โมลาร์ ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมต่ำกว่า 100 ในทุกส่วนผสม

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา

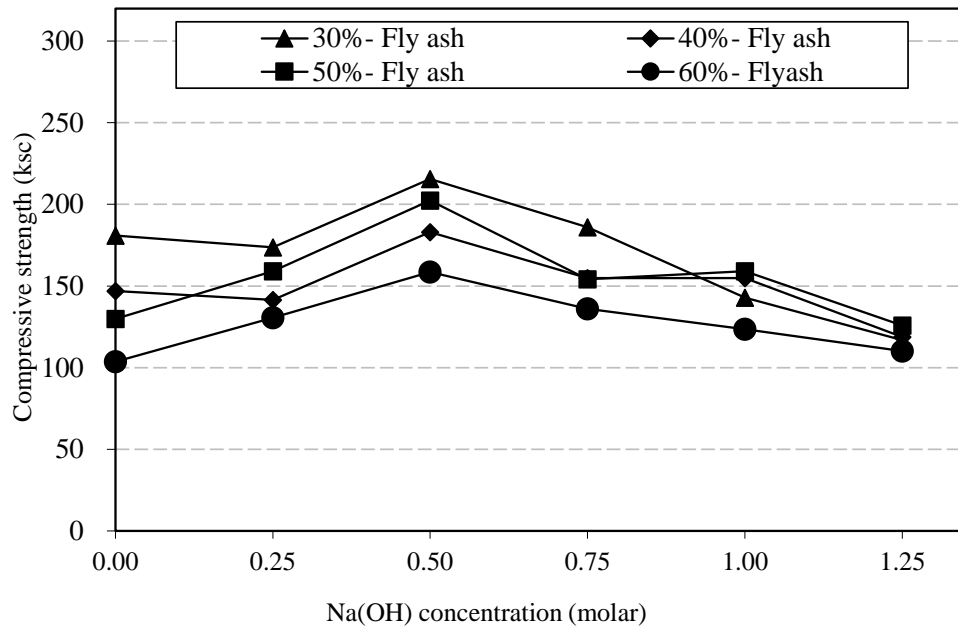
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)					กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบ กับกลุ่มควบคุม (ร้อยละ)
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	
IF 30	129	146	181	219	268	100
IF30-0.25M	125	136	174	232	274	106
IF30-0.50M	167	182	216	271	306	124
IF30-0.75M	129	151	186	225	259	103
IF30-1.00M	110	121	143	193	224	88
IF30-1.25M	81	83	117	160	180	73
IF 40	108	109	147	187	227	100
IF40-0.25M	107	123	141	191	222	102
IF40-0.50M	125	152	183	229	250	122
IF40-0.75M	107	128	155	195	212	104
IF40-1.00M	104	126	155	183	201	98
IF40-1.25M	67	94	119	147	187	79
IF 50	84	102	130	166	193	100
IF50-0.25M	86	108	159	190	224	114
IF50-0.50M	138	158	202	242	268	146
F50-0.75M	92	119	154	190	234	114
IF50 - 1.00M	94	119	159	197	217	119
IF50-1.25M	74	91	126	150	180	91
IF 60	74	83	104	149	162	100
IF60-0.25M	78	104	131	159	179	107
IF60-0.50M	94	135	159	180	196	121
IF60 - 0.75M	81	126	136	185	219	125
IF60-1.00M	64	100	124	153	200	103
IF60-1.25M	57	84	110	130	152	87



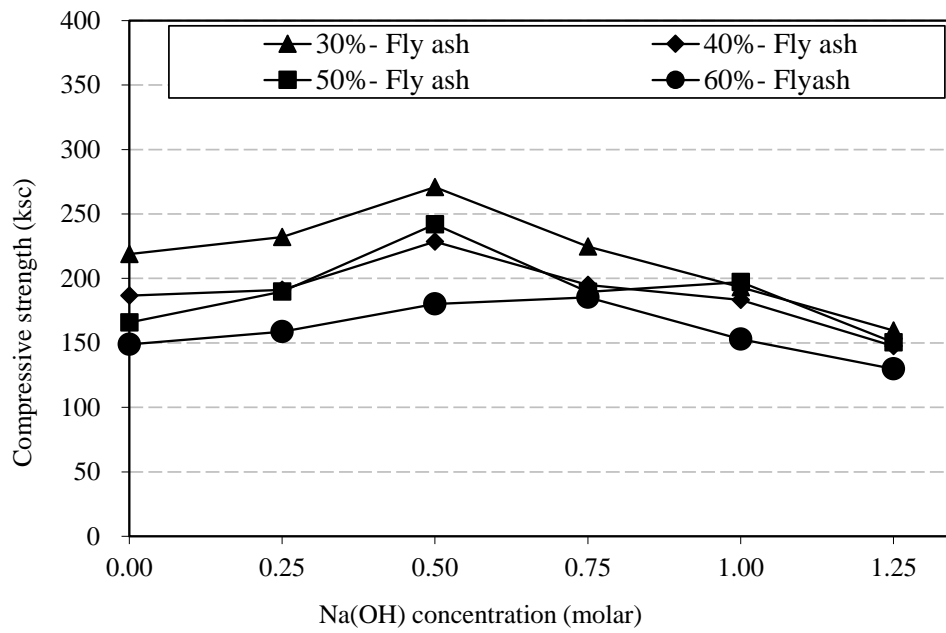
ก. อายุบ่ม 3 วัน



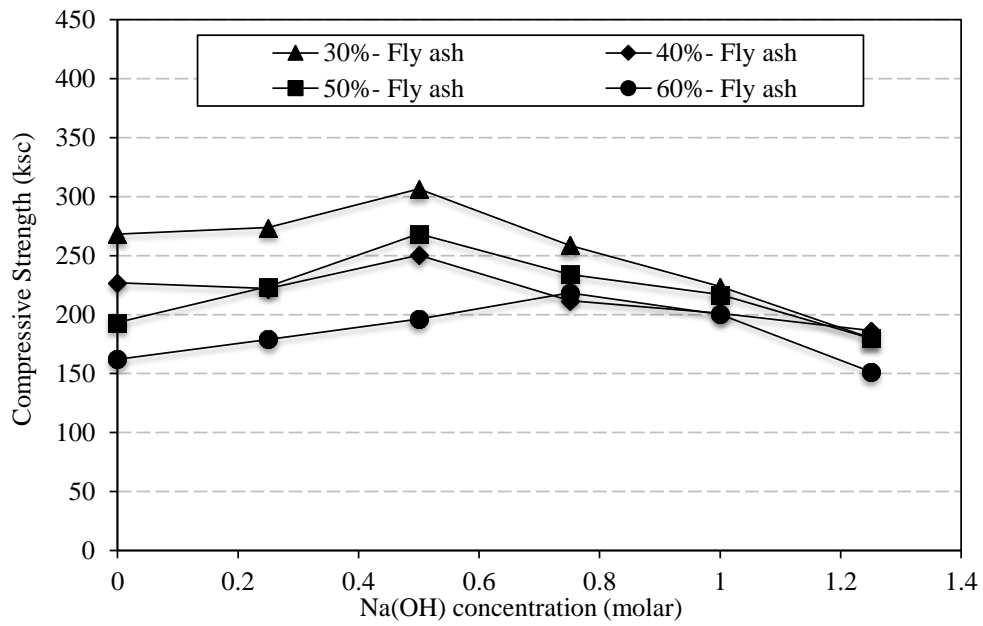
ข. อายุบ่ม 7 วัน



ก. อายุบ่ม 14 วัน

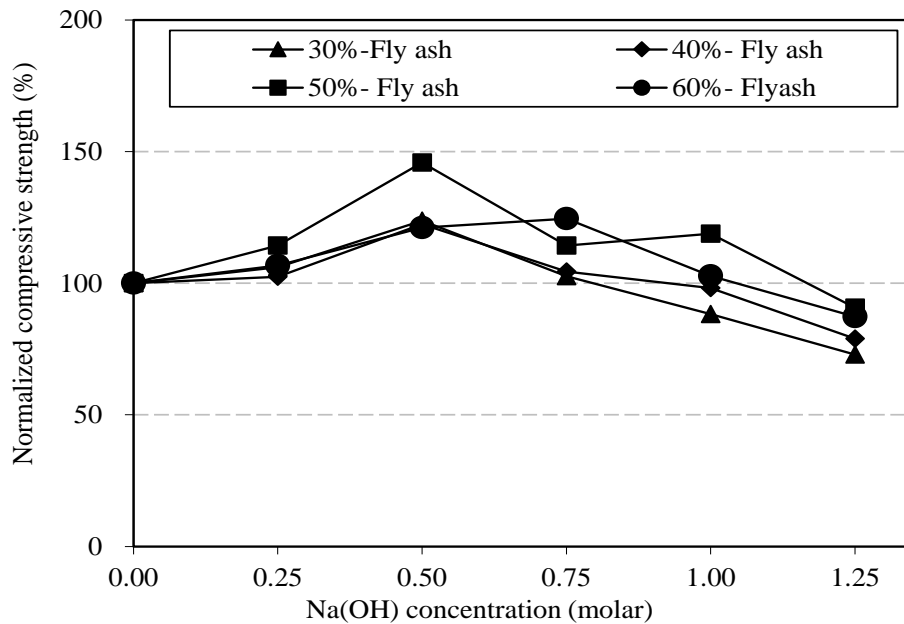


ง. อายุบ่ม 28 วัน



จ. อายุบ่ม 60 วัน

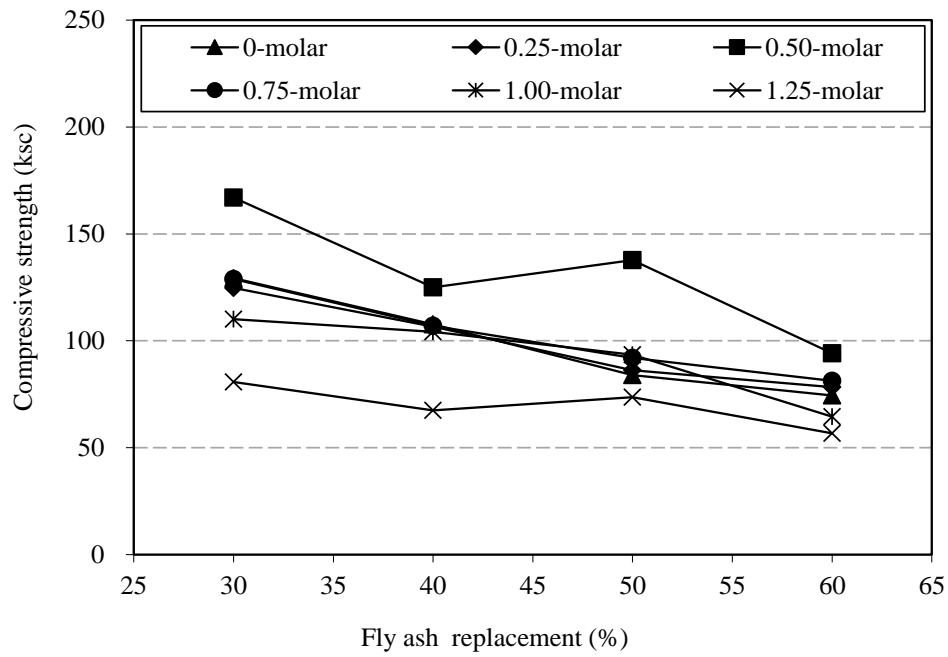
รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์



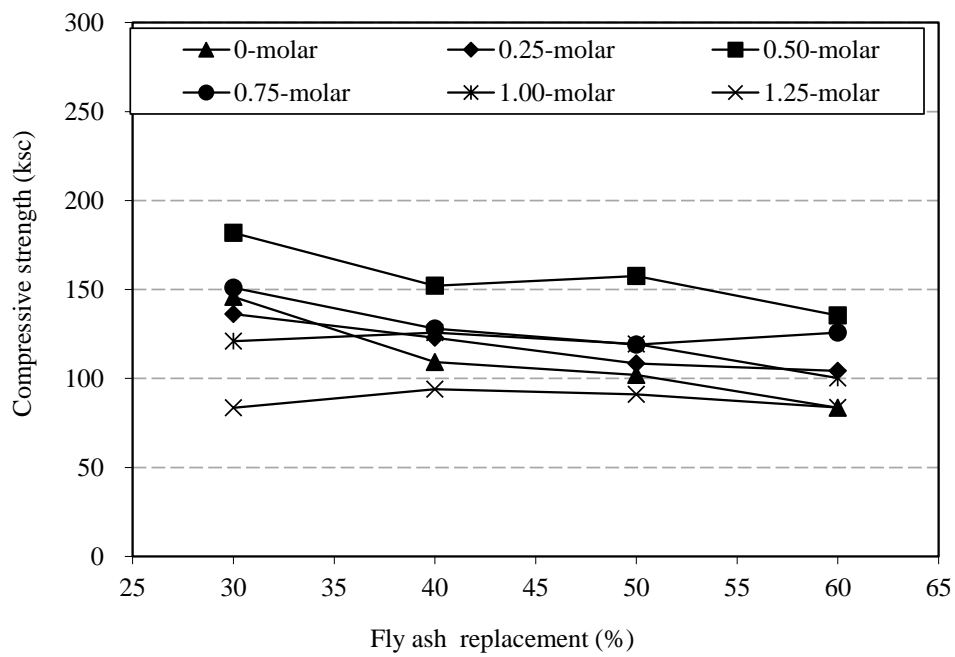
รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม

4.3.3 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

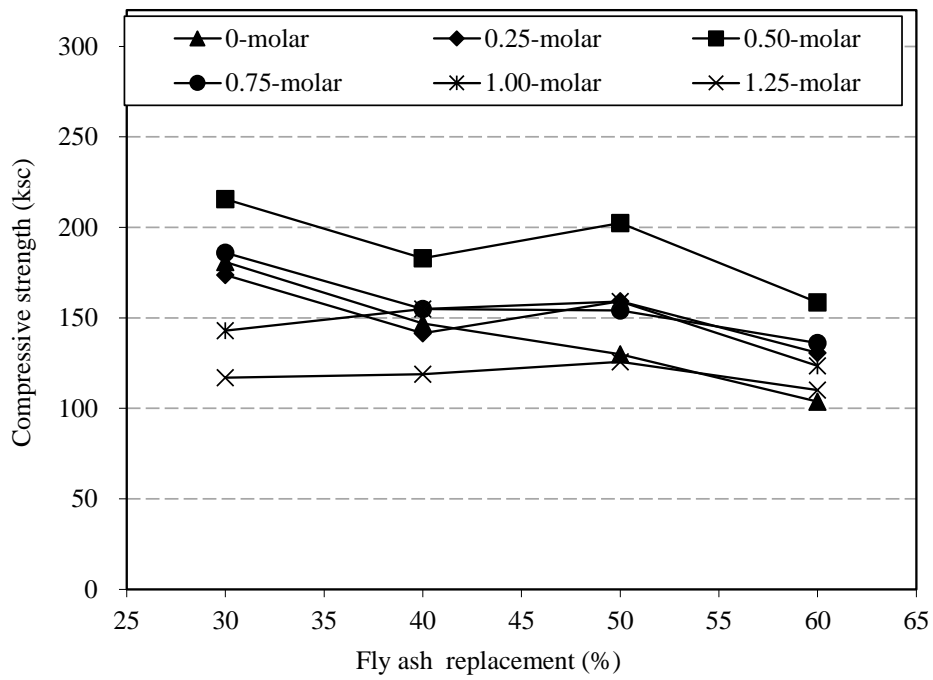
เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ดังรูปที่ 4.9 (ก), 4.9 (ข), 4.9 (ค), 4.9 (ง), 4.9 (จ) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ โดยเห็นผลชัดเจนในมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยา เช่น มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 ที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 219, 187, 166 และ 149 กก./ชม.² ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้น ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย ประกอบกับอายุของมอร์ต้าร์ที่ 28 วัน อาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ยังไม่สมบูรณ์ และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง จึงมีทำให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ น้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ต้าร์ในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ด่างเร่ง เช่น การใช้เถ้าถ่านหินเพิ่มจากร้อยละ 30 เป็น 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา ที่อายุ 28 วัน ลดลงเท่ากับ 53 กก./ชม.² (ลดลงจาก 219 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ IF30 เป็น 166 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ IF50) ในขณะที่มอร์ต้าร์กลุ่มเดียวกันนี้ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า มีผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน ลดลงแค่ 29 กก./ชม.² (ลดลงจาก 271 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ IF30-0.50M เป็น 242 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ IF50-0.50M) นอกจากนั้นพบว่า เมื่อพิจารณาในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ พบว่า มีผลทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์และให้กำลังอัดดีขึ้น ซึ่งสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นได้ (เพิ่มจาก 229 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ IF40-0.50M เป็น 242 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ IF50-0.50M) ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากสารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกา และอลูมินาจากเถ้าถ่านหินเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่ให้กำลังกับมอร์ต้าร์ได้ดีขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเหมาะสม สามารถใช้เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramin H.K et al. (2014) ผลการศึกษาพบว่า การใช้อัตราส่วนของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าถ่านหิน (A/FA) เท่ากับ 0.45 กับการใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14M จะให้กำลังอัดสูงที่สุด และการเพิ่มปริมาณของเถ้าถ่านหิน กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อปริมาณเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น โดยการลดอัตราส่วนของ A/FA จาก 0.50 เป็น 0.45 จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงที่สุด โดยเพิ่มจาก 31.08 นิวตัน/มม.² ไปเป็น 32.42 นิวตัน/มม.²



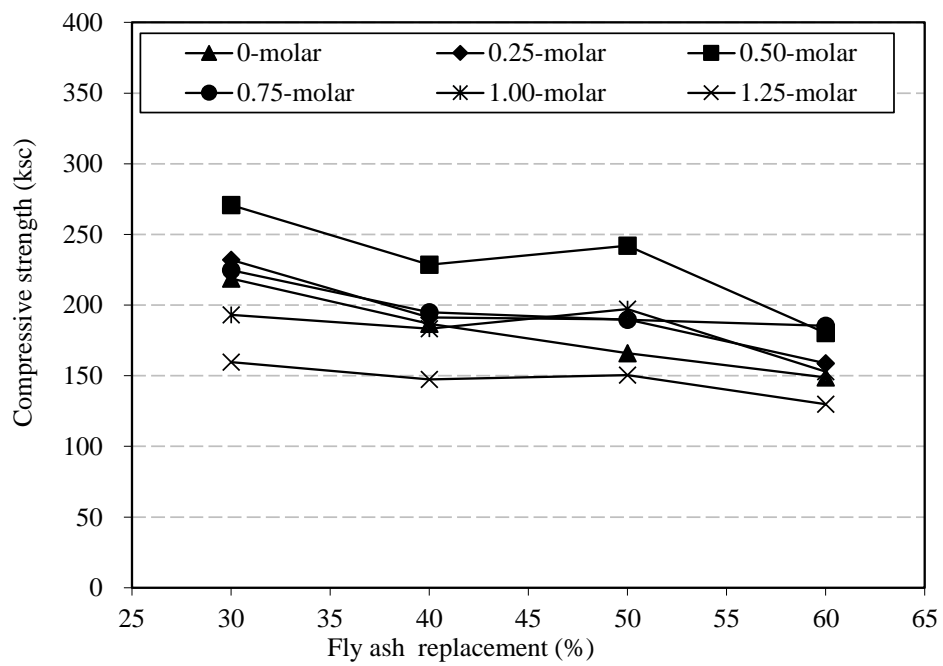
ก. อายุบ่ม 3 วัน



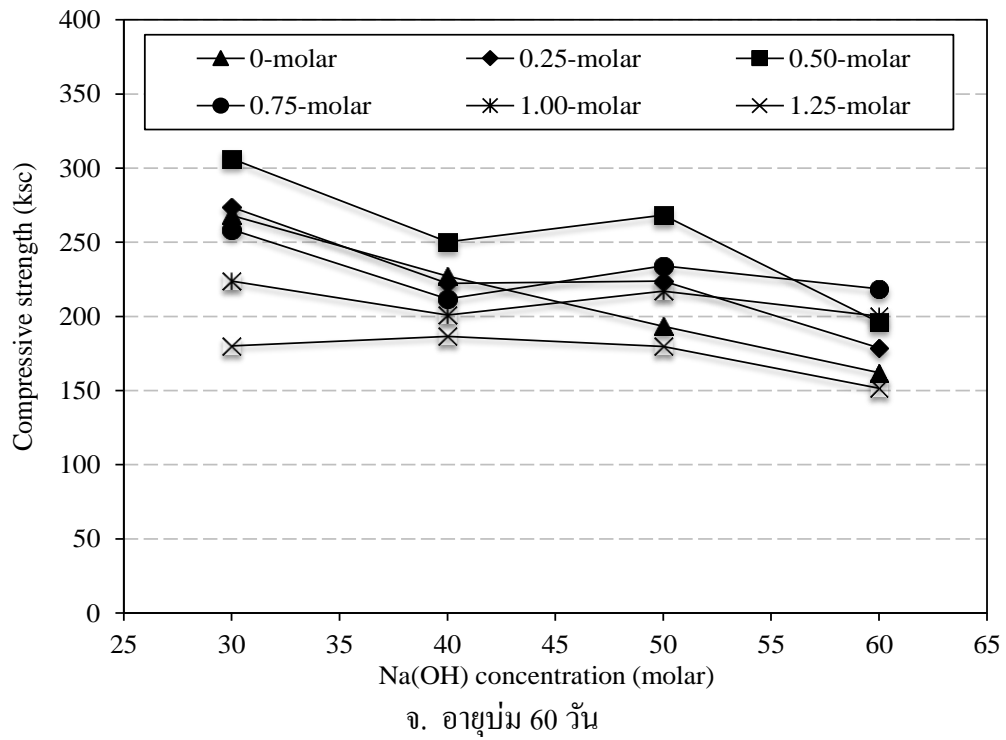
ข. อายุบ่ม 7 วัน



ค. อายุบ่ม 14 วัน



ง. อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณเต้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองงานวิจัย สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1.1 สมบัติของเพสต์

1) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายของ NaOH เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของเพสต์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในทุกส่วนผสม และเมื่อปริมาณของเถ้าถ่านหินที่ผสมในเพสต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของเพสต์ลดลง

2) ปริมาณของสารละลายต่าง NaOH ที่ใช้ในปริมาณที่สูงขึ้นจาก 0.25 โมลาร์ถึง 1.25 โมลาร์ ทำให้การก่อตัวระยะต้นและปลายใช้เวลานานขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าส่วนผสมควบคุม และทุกส่วนผสม การเพิ่มของปริมาณของเถ้าถ่านหินในร้อยละต่าง ๆ ไม่ได้ทำให้การก่อตัวของเพสต์ (ระยะต้นและปลาย) ใช้เวลานานขึ้นมากนัก แต่มีการเพิ่มขึ้นในปริมาณเล็กน้อย

5.1.2 สมบัติของมอร์ต้าร์

1) การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในทุกกลุ่มการแทนที่ของเถ้าถ่านหินที่ใช้สารละลาย ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH และกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์

2) การใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ต้าร์ร้อยละ 50 โดยวัสดุประสาน ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงที่สุด โดยทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ต้าร์ควบคุมได้ถึงร้อยละ 46

3) การใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ต้าร์ในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ที่ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้สารละลาย NaOH

4) การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และให้กำลังอัดดีขึ้น โดยสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากการทดสอบในงานวิจัยได้ใช้ค่าแรงปฏิกิริยาที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมวลรวมกับด่างอัลการไล (Alkaline aggregate reaction) ควรศึกษาเพิ่มเติม และทดลองเกี่ยวกับการขยายตัวของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างมวลรวมกับด่างอัลคาไลน์ (Alkaline)

2) ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของเพสต์เมื่อมีการใช้ค่าแรงปฏิกิริยาทุก ๆ ความเข้มข้นและเถ้าถ่านหิน

3) ศึกษาเพิ่มเติมกับการเอาไปใช้งานจริงและสอดคล้องกับแนวปฏิบัติของการใช้งาน เช่น การทำอิฐบล็อก หรืออาจเอาไปทำเป็นชิ้นส่วนของคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อให้สอดคล้องกับงานจริงมากขึ้น เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- กนกเนตร ชื่นนกลุ่ม วริศรา โกระวิโยชิน และ วิเชียร ชาลี, 2557. ผลของความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจาก เถ้าถ่านหิน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 24(1) : 56-65.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ. (2551). *การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2552. กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 15(1): 13-22.
- ธีรทรัพย์ รัตชนภาส. (2545). *ผลกระทบของวัสดุปอชโซลานที่มีต่อกำลังอัดและการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริกของคอนกรีต*. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต*. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547. *เถ้าลอยในงานคอนกรีต*, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย
- ประจิด จีรปภา. 2526. *คอนกรีตผสมซีเถ้าลอยแม่เมาะ*. สัมมนาทางวิชาการเรื่อง เทคโนโลยี สำหรับการ พัฒนาชนบทครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. 2528. *ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอยแม่เมาะ สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอาภา สชนเสาวภาคย์.(2550). *การพัฒนาคุณภาพของเถ้าหนักโดยผสมร่วม ด้บเถ้าแกลบ*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). *การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต*. รายงานโครงการหมายเลข CE 2012-21. <http://www.siamchemi.com>
- วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววกุ่ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546. วัสดุปอชโซลาน ชนิดใหม่จากเถ้าปลาล์มน้ำมัน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม, หน้า 459-474.
- วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552. การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้า ก้นเตา, *Burapha Sci.*, J.14 (1) หน้า 47-55
- วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552. การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้า ก้นเตา, *Burapha Sci.*, J.14 (1) หน้า 47-55

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549. การศึกษาการชะงักงันหิน
 ดิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน, *วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร.*,
 ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.

ACI 232.2R-96, Use of Fly Ash in Concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*.

ACI 255R-99, Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements. *ACI Manual of Concrete Practice*.

ACI 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*.

ASTM C 618-00, 2001, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural
 Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, 310-313.

ASTM C 305-12, 2001, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and
 Mortars of Plastic Consistency, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02

ASTM C 230-08, 2001, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement,
Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02

ASTM C 187-98, 2001, Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement, *Annual
 Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02

ASTM C191, 2001, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02

Bahadure B.M., Naik N.S., 2013. Effect of Alkaline Activator on Workability and Compressive
 Strength of Cement Concrete with RHA, *International Journal of Computational
 Engineering Research* 3 (5) : pp. 505-514

Bamforth P.B., 1980. In situ measurement of the effect of partial Portland cement replacement using
 either fly ash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass
 concrete, *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, 29, pp. 777-800

Boakye K.A., 2012. Improvement of setting time and early strength development of pozzolana cement
 through chemical activation, *Faculty of Chemical and Materials Engineering*, May
 2012.

Chalee W. and Jaturapitakkul C., 2009. Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride
 diffusion coefficient of concrete in marine environment, *Materials and Structures* 42 : pp.
 505-514

- Chalee W., Sasakul T., Suwanmaneechot P., Jaturapitakkul C., 2013. Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 37 : 47-53.
- Chalee W., Ausapanit P. and Jaturapitakkul C., 2010. Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Mater Design*, 3 : 1242-1249.
- Cheewaket T., Jaturapitakkul C., Chalee W., 2014. Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site. *Materials and Structures*, 47 : 1501–1511.
- Chindaprasirt P. and Chalee W., 2014. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site, *Construction and Building Materials* 63, pp. 303–310
- Chindaprasirt P., Chalee W., Jaturapitakkul C., Rattanasak R., 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers, *Waste Manage* 29: 539-543.
- Chindaprasirt P., Chiyasena T. and Sirivivatnanon V., 2009. High Strength concrete containing fly ash and black boiler rice husk ash, *Proceedings of the 4th Symposium on Infrastructure*, pp. 363-368, 3-5 April 2009.
- Fareed Ahmed Memon, 2013. Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete,” *Journal of Engineering Science and Technology*, 8(1), pp. 44-56.
- Gopalan MK. and Haque MN., 1993. Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete, *ACI Materials Journal*. 90-M12, pp. 3-28.
- Helmut R., 1987. Fly ash in cement and concrete,” *Portland Cement Association*.
- Karim M.R., Zain M.F.M., Jamil M., Lai F.C, and Islam M.N., 2011. Strength development of mortar and concrete containing fly ash: A review, *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6(17), pp. 4137-4153.
- Lea F.M.. 1970, *The Chemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnold Publishers, pp. 361, 414-423.
- Martinez R. and Palomo A., 2001. Microstructure, properties and materials, 3ed, *McGraw-Hill, United State of America*.
- Mustafa A.M. and Bakri Al., 2011. The processing, Characterization and properties of fly ash based geopolymer concrete, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, Vol. 30, pp. 90-97.

- Mustafa A.M. and Bakri Al., 2011. Microstructure of different NaOH molarity of fly ash based green polymeric cement, *Journal of Engineering and Technology Research*, Vol. 3, pp. 44-49.
- Neville A.M., 1995, *Properties of Concrete*, 4th ed., Prentice Hall, London, pp. 269-317
- Owen PL., "Fly ash and its usage in concrete," *The journal of Concrete Society*, 13, pp. 21-26, 1979.
- Pradip N. and Prabir K.S., 2015. Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature, *Cement and Concrete Composites*, 55, pp. 205-214.
- Puertas F., Martinez-Ramirez S., Alonso S. and Vazquez T., 2000. Alkali-activated fly ash/slag cement strength behavior and hydration products, *Cement and Concrete Res.*, 30, pp. 1625-1632.
- Rattanasak R. and Chindapasirt P., 2009. Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Miner Eng* 22:1073-1078.
- Ramin H.K et al., 2014. The Effect of Different Parameters on the Development of Compressive Strength of Oil Palm Shell Geopolymer Concrete, *The Scientific World Journal*, 16 pages.
- Reaksmey S. and Chalee W., 2016. Compressive strength improvement of concrete containing rice husk ash using an alkaline activator, *The Journal of KMUTNB*, 3.
- Ryou J., 2004. Improvement on reactivity of cementitious waste materials by mechanochemical Activation, *Materials Letters*, pp. 4773.
- Sata V., Tangpagasit J., Jaturapitakkul C., Chindapasirt P., 2012. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix, *Cem Concr Compos* 34: 94 -100.
- Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C., Chindapasirt P., 2010. Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp.236-240.
- Samarin A., Munn RL. and Ashby JB., 1983. The use of fly ash in concrete-Australian experimentce, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-products in Concrete, *American Concrete Institute*, SP-79, pp. 143-172, 1983.
- Sodium Hydroxide-NaOH, "Product file: Cas# 1310-73-2". *Management of ocular and cutaneous chemical splashes*, 2011.

Thomas M., 2007. Optimizing the use of fly ash in concrete, Portland Cement Association, IS. 548.

Tangchirapat W., Jaturapitakkul C. and Chindaprasirt P., 2009. Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-Strength Concrete. *Construction and Building Materials*, 23 : 2641-2646.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- 1) Reaksmev Soeurt, รัฐพล สมณา และ วิเชียร ซาลี. (2559). ผลของต่างเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหิน. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11*, ชลบุรี (MAT 025)

งานประชุมวิชาการคอนกรีต
ประจำปีครั้งที่ 11th
Annual Concrete
Conference

17-19 กุมภาพันธ์ 2559

ณ โรงแรมสีมารानी

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา



สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association



SIRDC
SIIRI RANGSIT UNIVERSITY

จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

16.10-17.25 น.	การนำเสนอบทความวิจัย (ห้อง SIMA 1)
ประธานภาค : ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	
รองประธานภาค : ผศ.นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา	
16.10-16.25 น.	MAT-009 การศึกษาการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ธนาวิชญ์ ศรีปาน, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
16.25-16.40 น.	MAT-025 ผลของต่างเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน Reaksmey Soeurt, วิเชียร ชาลี, รัฐพล สมณา
16.40-16.55 น.	MAT-032 การใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุบ่มภายในมอร์ตาร์ ชาคริต โยสอาด, รัฐพล สมณา, จิรศักดิ์ สุพรรณวัน
16.55-17.10 น.	MAT-038 ผลของอุณหภูมิบ่มและสภาพการบ่มต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ มงคล นามลักษณ์
17.10-17.25 น.	MAT-056 กำลังอัดของคอนกรีตพูนในสารละลายคลอไรด์ ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ปริญญา จินดาประเสริฐ, ไกรสร อัมวัลย์, ภูรินทร์ เสาศิรี, กรกฎ ปรีอทอง, Shigemitsu Hatanaka

16.10-17.25 น.	การนำเสนอบทความวิจัย (ห้อง SIMA 2)
ประธานภาค : รศ.ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ	
รองประธานภาค : ดร.อภิชาติ คำภาหาล้า	
16.10-16.25 น.	MAT-014 การเพิ่มสมรรถนะด้านความต้านทานการเกิดการเอื่อมและการแยกตัวสำหรับคอนกรีตงานเข็มเจาะด้วยวัสดุประสานร่วมสามชนิด ฐาปณี ศุภกิจวัฒนา, รัฐภูมิ ปริชาติปริชา
16.25-16.40 น.	MAT-003 การนำเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นปอซโซลานในงานวัสดุก่อสร้าง เกรียงไกร ปราโมทย์, ปิติวัฒน์ วัฒนชัย
16.40-16.55 น.	MAT-041 ระบบผนังแบบคอมโพสิตสำหรับภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย ทงศักดิ์ อิ่มใจ, จิราวัฒน์ พุ่มเกษร, นุกุล ชูทอง
16.55-17.10 น.	MAT-042 การปรับปรุงอิฐบูนระบราณสถานให้ต้านทานการเสื่อมสภาพจากน้ำ ณัฐชัย ใจรักษา, ปิติวัฒน์ วัฒนชัย
17.10-17.25 น.	MAT-043 ผลลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นจากหินพิมพ์มิซสำหรับชุมชน ประชุม คำพุ่ม, ธงเทพ ศิริโสตา

ผลของด่างเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน

Effect of alkaline activator on properties of mortar containing fly ash

Reaksmeay Soeurt (Reaksmeay Soeurt)¹รัฐพล สมณา (Rattapon Somna)²วิเชียร ชาลี (Wichian Chalee)^{3*}¹นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน^{3*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง โดยใช้ด่างในการเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผสมมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.00 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลอมมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม³ เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในน้ำเป็นเวลา 3 7 14 และ 28 วัน ผลการศึกษา พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงขึ้นเป็น 1.25 โมลาร์

ABSTRACT : This research aimed to improve the compressive strength of high volume fly ash (FA) mortar using alkaline activator. The original fly ash from Mae Moh power plant was used as a partial replacement of Portland cement type I at 30, 40, 50 and 60% by weight of the binder. The NaOH concentrations of 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 and 1.25 molar were used as an alkaline activator in FA mortar. Mortar cube specimens of 50x50x50 mm³ were cast for compressive strength test at the ages of 3, 7, 14 and 28 days. The results revealed that the compressive strength of mortar containing fly ash tend to increases with the NaOH concentration of 0.50 molar, especially in mortar with fly ash replacement of 50% by weight of binder. However, the compressive strength of fly ash mortar found to decreases when using the NaOH concentration up to 1.25 molar.

KEYWORDS : Mortar, Fly ash, Alkali activator, Compressive strength

1. บทนำ

การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีตได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีฐานข้อมูล

งานวิจัยที่ยืนยันตรงกันว่า วัสดุปอชโซลานที่มีคุณภาพดี นอกจากจะส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตต่ำลง ยังทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านต่างๆ ดีขึ้น เช่น ความคงทน การลด

ความร้อนในคอนกรีต การป้องกันการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นต้น [1-3] นอกจากนี้ วัสดุปอซโซลานหลายชนิดยังเป็นผลพลอยได้หรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย ซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนลดปัญหาการกำจัดทิ้งของวัสดุเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน มีข้อดีอยู่ในส่วนของการกำจัดระยะต้นที่ต่ำ และการใช้วัสดุปอซโซลานในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลให้กำลังของคอนกรีตต่ำลง ตลอดจนวัสดุปอซโซลานบางตัวมีอนุภาคที่หยาบ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ช้าและให้กำลังอัดที่ต่ำ จึงเป็นเหตุที่วัสดุปอซโซลานหลายตัว ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น เถ้าชีวมวลต่างๆ ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบ เปลือกไม้ เป็นต้น เพราะเถ้าดังกล่าวถึงแม้จะมีซิลิกาและอลูมินาสูง แต่มีอนุภาคที่หยาบจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่สมบูรณ์ [4-5] จึงจำเป็นต้องบดให้ละเอียดก่อนนำมาใช้งาน ดังนั้นหากสามารถหาวิธีเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานให้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น นอกเหนือจากวิธีการบดให้ละเอียด ดังที่กล่าวมาข้างต้น ก็อาจเป็นแนวทางอีกวิธีที่สามารถนำวัสดุปอซโซลานมาใช้งานได้ดียิ่งขึ้น โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด ตลอดจนวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพคืออยู่แล้ว ก็อาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นได้

การใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงผสมในวัสดุปอซโซลานจะสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานออกมาได้ [6] โดยซิลิกาและอลูมินาที่ถูกชะออกมา สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียม

อลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่เป็นสารที่ให้กำลังกับคอนกรีตได้ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ด่างที่มีความเข้มข้นต่างกันในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ในมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินปริมาณมาก ให้สามารถรับแรงเชิงกลได้ดีโดยไม่ต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้ละเอียด

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [7] สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเถ้าถ่านหิน ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และความละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนักซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 [8] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.2 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละ โดยน้ำหนัก (%)	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน (F)
Silicon dioxide, SiO_2	20.10	35.20
Aluminum oxide, Al_2O_3	5.20	19.20
Iron oxide, Fe_2O_3	3.15	17.81
Calcium oxide, CaO	60.24	16.65
Magnesium oxide, MgO	1.13	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.11	0.63
Potassium Oxide, K_2O	0.43	2.44
Sulfur trioxide, SO_3	2.42	1.5
LOI.	2.03	0.15

2.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.65 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.70 และโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.67

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ได้ใช้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าถ่านหิน) ต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 และใช้น้ำผสมที่ให้ค่าการไหลแก่เท่ากับ 110 ± 5 ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุม และส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม³ เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในน้ำเป็นเวลา 3 7 14 และ 28 วัน การเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงดังภาพที่ 1

ตารางที่ 2 ส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุม

ส่วนผสม	สัดส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)			
	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหิน	ทราย	น้ำ
F 30	0.70	0.30	2.75	0.63
F 40	0.60	0.40	2.75	0.62
F 50	0.50	0.50	2.75	0.61
F 60	0.40	0.60	2.75	0.63

ตารางที่ 3 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา

ส่วนผสม	สัดส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)							
	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหิน	ทราย	สารละลาย NaOH (โมลาร์)				
				0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
F30-0.25M	0.70	0.30	2.75	0.59				
F30-0.50M	0.70	0.30	2.75		0.58			
F30-0.75M	0.70	0.30	2.75			0.59		
F30-1.00M	0.70	0.30	2.75				0.60	
F30-1.25M	0.70	0.30	2.75					0.61
F40-0.25M	0.60	0.40	2.75	0.58				
F40-0.50M	0.60	0.40	2.75		0.58			
F40-0.75M	0.60	0.40	2.75			0.58		
F40-1.00M	0.60	0.40	2.75				0.59	
F40-1.25M	0.60	0.40	2.75					0.60
F50-0.25M	0.50	0.50	2.75	0.58				
F50-0.50M	0.50	0.50	2.75		0.57			
F50-0.75M	0.50	0.50	2.75			0.57		
F50-1.00M	0.50	0.50	2.75				0.58	
F50-1.25M	0.50	0.50	2.75					0.60
F60-0.25M	0.40	0.60	2.75	0.57				
F60-0.50M	0.40	0.60	2.75		0.56			
F60-0.75M	0.40	0.60	2.75			0.56		
F60-1.00M	0.40	0.60	2.75				0.58	
F60-1.25M	0.40	0.60	2.75					0.59



ภาพที่ 1 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังอัด

3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้้ถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาดังตารางที่ 4 และพิจารณาที่อายุการบ่มช่วงต้น (3 วัน) ดังภาพที่ 2(ก) พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่ของแก้้ถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 โมลาร์ ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH โดยแนวโน้มดังกล่าวเห็นชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุมอร์ตาร์ถึง 28 วัน ดังภาพที่ 2(ข)ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.5 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกจากแก้้ถ่านหิน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [9] เช่น กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้้ถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 166 190 242 190 197 และ 150 กก/ซม.² ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการทดสอบ เช่น กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้้ถ่านหินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 187 191 229 195 183 และ 147 กก/ซม.² ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดมอร์ตาร์ เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นมากกว่า

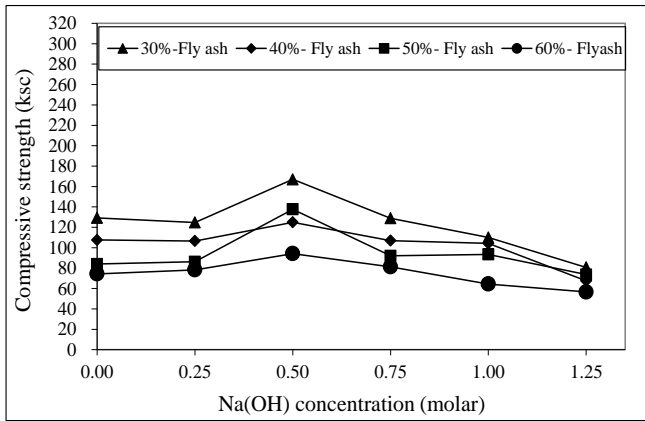
0.50 โมลาร์ อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากแก้้ถ่านหิน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจือความชื้นจะทำให้มีความลื่นมากขึ้น และส่งผลให้แรงยึดเกาะ ภายในซีเมนต์เพสต์ต่ำลง ส่งผลให้กำลังของมอร์ตาร์ลดลงได้ [10] อย่างไรก็ตาม ที่อายุมอร์ตาร์นานขึ้นเป็น 28 วัน พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ และผสมแก้้ถ่านหินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น เริ่มมีผลต่อการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ส่งผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดมากขึ้น การใช้ต่างเร่งปฏิกิริยาในมอร์ตาร์ที่ผสมแก้้ถ่านหินในปริมาณสูงในครั้งนี้ พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่แก้้ถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.75 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่ากลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ใช้แก้้ถ่านหินในปริมาณสูง (ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นถึง 1.00 โมลาร์ มีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม เช่น มอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมแก้้ถ่านหินร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 166 และ 149 กก/ซม.² ตามลำดับ และเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 โมลาร์ เร่งปฏิกิริยาในมอร์ตาร์ดังกล่าว ได้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 190 242 190 197 และ 159 180 185 153 กก/ซม.² ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้ต่างเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ให้ผลที่ดีขึ้นในมอร์ตาร์ที่ใช้แก้้ถ่านหินในปริมาณสูง และเริ่มเห็นผลชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุบ่มนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นในช่วงหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง [2, 3] ส่วนการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.25 โมลาร์ พบว่า ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมในทุกส่วนผสม และทุกอายุการบ่ม จึง

ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นค่าแรงปฏิบัติการปอซโซลาน
ในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

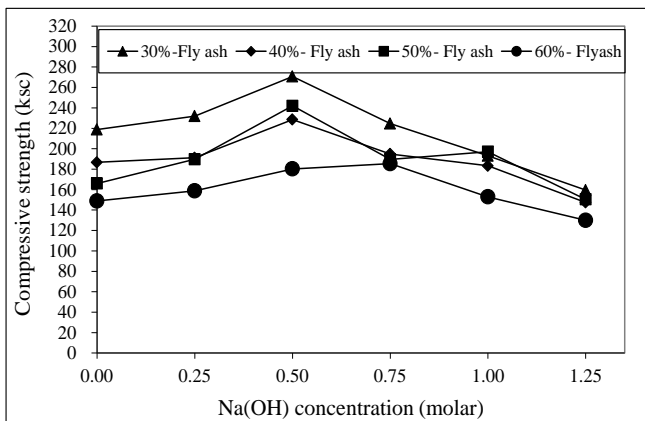
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของ
สารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ในรูป
ของร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม
(Normalized compressive strength) ของมอร์ตาร์ที่
อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 3 พบว่า ความเข้มข้นของ
สารละลาย NaOH ที่ 0.5 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการ
แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน มีค่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์
เทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 และมี
แนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย
NaOH สูงกว่า 0.5 โมลาร์ ซึ่งการใช้สารละลาย
NaOH เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหิน
ผสมในมอร์ตาร์ร้อยละ 50 โดยวัสดุประสาน ให้ผล
ต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด โดยทำให้
กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุมได้เกือบถึง ร้อย
ละ 50 (ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่ม
ควบคุมเท่ากับ 146) ส่วนในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินใน
ปริมาณสูงถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
พบว่า การใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.75 โมลาร์
ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด (ร้อยละ
กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมเท่ากับ
125) โดยสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น
0.50 โมลาร์ (ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ
กลุ่มควบคุมเท่ากับ 121) เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลจาก
ปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น การใช้ค่าที่มีความ
เข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาให้เข้า
ทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น ส่วนการใช้
สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.25 โมลาร์
ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม
ต่ำกว่า 100 ในทุกส่วนผสม

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้
สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)				กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม (ร้อยละ)
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
F 30	129	146	181	219	100
F30-0.25M	125	136	174	232	106
F30-0.50M	167	182	216	271	124
F30-0.75M	129	151	186	225	103
F30-1.00M	110	121	143	193	88
F30-1.25M	81	83	117	160	73
F 40	108	109	147	187	100
F40-0.25M	107	123	141	191	102
F40-0.50M	125	152	183	229	122
F40-0.75M	107	128	155	195	104
F40-1.00M	104	126	155	183	98
F40-1.25M	67	94	119	147	79
IF 50	84	102	130	166	100
F50-0.25M	86	108	159	190	114
F50-0.50M	138	158	202	242	146
F50-0.75M	92	119	154	190	114
IF50 - 1.00M	94	119	159	197	119
F50-1.25M	74	91	126	150	91
F 60	74	83	104	149	100
F60-0.25M	78	104	131	159	107
F60-0.50M	94	135	159	180	121
IF60 - 0.75M	81	126	136	185	125
F60-1.00M	64	100	124	153	103
F60-1.25M	57	84	110	130	87

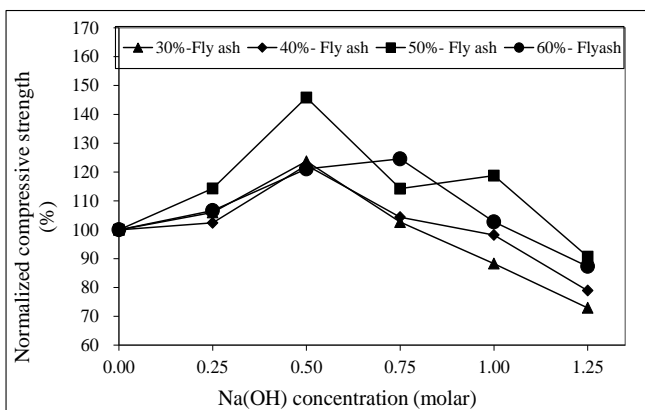


ก) อายุบ่ม 3 วัน



ข) อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

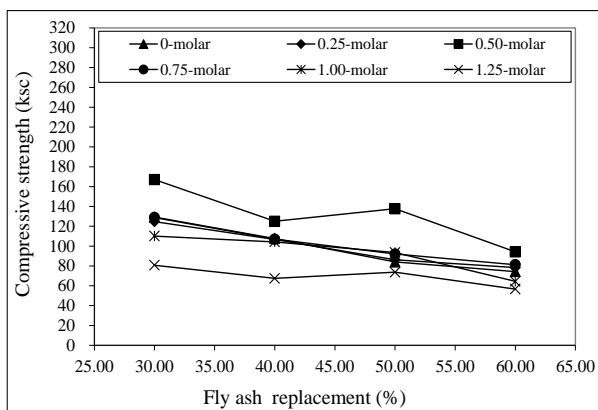


ภาพที่ 3 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม

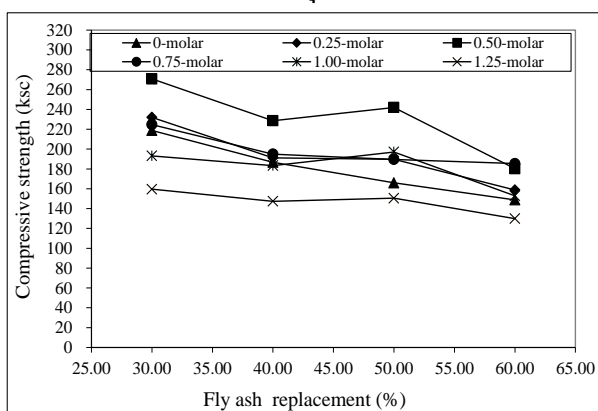
3.2 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุการบ่ม 3 และ 28 วัน ดังภาพที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ โดยเห็นผลชัดเจนในมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยา เช่น มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 40 50 และ 60 ที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 219 187 166 และ 149 กก./ชม.² ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้น ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย ประกอบกับอายุของมอร์ต้าร์ที่ 28 วันอาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ยังไม่สมบูรณ์ และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง จึงมีทำให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ น้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ต้าร์ในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ด่างเร่ง เช่น การใช้เถ้าถ่านหินเพิ่มจากร้อยละ 30 เป็น 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา ที่อายุ 28 วัน ลดลงเท่ากับ 53 กก./ชม.² (ลดลงจาก 219 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ F30 เป็น 166 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ F50) ในขณะที่มอร์ต้าร์กลุ่มเดียวกันนี้ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า มีผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน ลดลงแค่ 29 กก./ชม.² (ลดลงจาก 271 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ F30-0.5M เป็น 242 กก./ชม.² ในมอร์ต้าร์ F50-0.5M) นอกจากนั้นพบว่า เมื่อพิจารณาในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ พบว่า มีผลทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และให้กำลังอัดดีขึ้น ซึ่ง

สังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นได้ (เพิ่มจาก 229 กก./ cm^2 ในมอร์ตาร์ F40-0.5M เป็น 242 กก./ cm^2 ในมอร์ตาร์ F50-0.5M) ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากสารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกา และอลูมินาจากเถ้าถ่านหินเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และได้เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ที่ให้กำลังกับมอร์ตาร์ได้ดีขึ้น [2, 3] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมสามารถใช้เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้



ก) อายุบ่ม 3 วัน



ข) อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

4. สรุปผล

1) การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 โมลาร์ ในทุกกลุ่มการแทนที่ของเถ้าถ่านหินที่ใช้สารละลายให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีความเข้มข้นสูงเกิน 0.50 โมลาร์

2) การใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ตาร์ร้อยละ 50 โดยวัสดุประสาน ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด โดยทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุมได้ถึงร้อยละ 46

3) การใช้เถ้าถ่านหินผสมในมอร์ตาร์ในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้สารละลาย NaOH

4) การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และให้กำลังอัดดีขึ้น โดยสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนันสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 128/2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, 2014. Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—

- 10-year results in marine site. Materials and Structures, 47 : 1501–1511.
- [2] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, C. Jaturapitakkul, 2013. Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. Cement and Concrete Composites, 37 : 47-53.
- [3] W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, 2010. Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. Cement and Mater Design, 3 : 1242-1249.
- [4] V. Sata, J. Tangpagasit, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, 2012. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. Cement and Concrete Composites, 34 : 94 -100.
- [5] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and P. Chindapasirt, 2009. Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-Strength Concrete. Construction and Building Materials, 23 : 2641-2646.
- [6] R. Rattanasak and P. Chindapasirt, 2009. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer Miner Eng. 22 : 1073-1078.
- [7] ASTM. Standard Specification for Portland Cement, C150 / C150M - 12. Annual Book of ASTM Standards 2012, 04.01.
- [8] ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, C 618-00. Annual Book of ASTM Standards 2001, 04.02.
- [9] B.M. Bahadure, N.S. Naik, 2013. Effect of Alkaline Activator on Workability and Compressive Strength of Cement Concrete with RHA. International Journal of Computational Engineering Research, 3 : 505-514.
- [10] P. Chindapasirt, W. Chalee, 2014. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. Construction and Building Materials, 63 : 303–310.

ภาคผนวก ข
รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2559A10802114 สัญญาเลขที่ 128/2559
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ
พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...ผลของต่างแรงปฏิบัติการต่อสมบัติของมอร์ตาร์จากเถาถ่านหิน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย (ศ. /รศ. /ผศ. /ดร. /อ.) ...รศ.ดร.วิเชียร ชาลี...

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2559

ระยะเวลาดำเนินการ จำนวน ..1...ปี...- .เดือน

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...242,550บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2558...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...194,040.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2559.....

งวดที่ 3 (10%) จำนวน ...-.....บาท เมื่อ ...-.....

รวม ...436,590.....บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	120,000	120,000	0
3. ค่าวัสดุ	124,590	124,590	0
4. ค่าใช้สอย	192,000	192,000	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	48,510	48,510	0
รวม	485,100	485,100	0

(รศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ภาคผนวก ค
ประวัตินักวิจัย