

ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสมบัติของวัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินปริมาณมาก

REAKSMEY SOEURT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ REAKSMEY SOEURT ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. สำเริง รักซ้อน)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

..... กรรมการ
(ดร. เทียง ชีวะเกตุ)

..... กรรมการ
(ดร. สุนิสา คำสุข)

คณะวิศวกรรมศาสตร้อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2559

4005002: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ต่างเร่งปฏิกิริยา/ แก้วถ่านหิน/ เพลสต์/ มอร์ตาร์/ คอนกรีต

REAKSMEY SOEURT: ผลของต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสมบัติของวัสดุ
ประสานจากแก้วถ่านหินปริมาณมาก (EFFECT OF SODIUM HYDROXIDE (NaOH) ON
PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIAL FROM HIGH VOLUME FLY ASH)
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วิเชียร ชาติ, Ph.D., 199 หน้า. ปี พ.ศ. 2559

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้วถ่านหินในปริมาณสูง
โดยใช้ต่างในการเร่งปฏิกิริยา โดยใช้แก้วถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
ผสมมอร์ตาร์จากแก้วถ่านหินโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50, 0.75,
1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลอมมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.³ เพื่อทดสอบ
กำลังอัดที่อายุบ่มในน้ำเป็นเวลา 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน นอกจากนั้นได้ศึกษา ผลของความเข้มข้น
ของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหิน โดยแทนที่แก้วถ่านหินใน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ NaOH
ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นต่างเร่งปฏิกิริยา หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด
100 x 100 x 100 มม.³ หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7,
14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษา พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้วถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น
เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้
แก้วถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม
แก้วถ่านหิน มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงขึ้นเป็น 1.25 โมลาร์
ส่วนในคอนกรีตพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมแก้วถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลาย
NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ การใช้แก้วถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น
มีผลต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH มากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย
NaOH การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้
แก้วถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมในการนำไปใช้
งานคอนกรีต เนื่องจากให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 22 ที่อายุ
28 วัน

4005002: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: ALKALINE ACTIVATE/ FLY ASH/ PASTE/ MORTAR/ CONCRETE

REAKSMEY SOEURT: EFFECT OF SODIUM HYDROXIDE (NaOH)

ON PROPERTIES OF CEMENTIOUS MATERIAL FROM HIGH VOLUME FLY ASH

ADVISORY COMMITTEE: ASSOCIATE PROFESSOR WICHIAN CHALEE, Ph.D. 199

P. 2016.

The purpose of the research is to improve the compressive strength of high volume Fly Ash (FA) mortar using Alkaline activator. The original Fly Ash from Mae Moh power plant is 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 are used as an Alkaline activator in FA Mortar. Mortar cube specimens of $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ are cast for compressive strength test at the ages of 3, 7, 14, 28 and 60 days. In addition, the effect of NaOH concentration on the compressive strength of Fly Ash concrete are also studied. Fly Ash is used to replace Portland cement type I at the percentages of 40, 50, and 60 by weight of binder. Sodium hydroxide (NaOH) solution is introduced as an Alkaline activator at various molar concentrations of 0.00, 0.25, 0.50, and 0.75 molar. Concrete cube specimens of $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ have been cast. The specimens are cured in tap water for 3, 7, 14, 28, and 60 days and their compressive strengths are determined. The results indicate that the compressive strength of Mortar containing Fly Ash tends to increase 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 is decreased when using the NaOH concentration up to 1.25 molar. For concrete, The compressive strength of Fly Ash concretes are increased when the concentration of NaOH solution is less than 0.50 molar. Higher amount of Fly Ash in concretes also reduce their compressive strengths and a greater reduction is found in concretes without any activator of NaOH solution. In summary, using of NaOH solution at 0.50 molar concentration in concrete containing Fly Ash 50% by weight of binder will be optimal as its highest compressive strength which has been recorded at 22%, higher than the control concrete.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สำเริง รักซ้อน อาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่เป็นประธานกรรมการของวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และวิจารณ์ผลงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. เทียง ชีวะเกตุ และดร. สุนิสา คำสุข ที่เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบรวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ นอกจากนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากวิศวกรประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบต่าง ๆ เพื่อให้สำเร็จเป็นอย่างดี

เนื่องจากงานวิจัยและนิสิตได้ทุนการศึกษาจาก กองทุนของสมเด็จพระเทพเจ้าอานาจักรกัมพูชา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จึงขอขอบพระคุณ ณ ตอนนี้อย่าง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ SAM BUNRITH คุณแม่ KOL MARY และพี่ ๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ Mr. LYNA PRAK รุ่นพี่นิสิตปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำปรึกษาในการเขียน แก้ไข ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และการทดสอบในห้องปฏิบัติการตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูแก่เวทิตาแต่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

REAKSMEY SOEURT

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีเกี่ยวกับคอนกรีต	4
ปูนซีเมนต์.....	4
ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	5
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	7
ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่านหิน.....	10
การใช้วัสดุปอซโซลาน	12
วัสดุปอซโซลาน	13
ปฏิกิริยาปอซโซลาน	14
เถ้าถ่านหิน.....	15
ชนิดของเถ้าถ่านหิน.....	15
รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน	16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ขนาดและความละเอียด	17
ความถี่จำเพาะ	17
ความต้องการน้ำ	18
องค์ประกอบทางเคมี	18
การใช้เถ้านหินในคอนกรีต	19
ข้อกำหนดของเถ้านหิน	19
คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้านหิน	21
ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตสด	21
คอนกรีตแข็งตัว	23
โซเดียมไฮดรอกไซด์	25
ลักษณะเฉพาะของโซดาไฟ	25
การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์	26
คุณสมบัติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	26
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการชะซัลฟิดา อะลูมินาจากวัสดุปอซโซลาน	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเถ้านหิน	30
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	32
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	32
อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ	33
วิธีการดำเนินการวิจัย	35
การทดสอบในเพสต์	35
การทดสอบในมอร์ตาร์	35
การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังอัด	40
การทดสอบกำลังอัด	43

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การหล่อตัวอย่างคอนกรีต.....	45
ส่วนผสมคอนกรีต.....	45
การหล่อตัวอย่างคอนกรีต	46
การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต	47
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	48
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	49
สมบัติของวัสดุ	49
วัสดุประสาน	49
สมบัติทางกายภาพ	49
สมบัติทางเคมี.....	50
สมบัติของมวลรวม.....	50
ค่าแรงปฏิกิริยา	50
สมบัติของเพสต์	51
ความต้องการน้ำของเพสต์ที่ทำให้ความชื้นเหลือปกติ	51
ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อปริมาณน้ำของเพสต์	52
ผลของปริมาณแก้วกันหินต่อความต้องการน้ำของเพสต์ที่ทำให้ความชื้นเหลือ ปกติ	53
การก่อตัวของเพสต์	54
ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการก่อตัวของเพสต์	54
ผลของปริมาณแก้วกันหินต่อการก่อตัวของเพสต์	54
สมบัติของมอร์ตาร์	58
การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์.....	58
ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์.....	62

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ผลของปริมาณเถ้านหินต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์	68
สมบัติของคอนกรีต	71
การยุบตัวของคอนกรีต	71
กำลังอัดของคอนกรีต	74
การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต	74
ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต	77
ผลของปริมาณเถ้านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีต	83
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	88
สรุปผลการทดลอง	88
สมบัติของเพสต์.....	88
สมบัติของมอร์ต้าร์	88
สมบัติของคอนกรีต.....	89
ข้อเสนอแนะ.....	89
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	103
ภาคผนวก ค.....	152
ภาคผนวก ง	162
ภาคผนวก จ	188
ประวัติย่อของผู้วิจัย	199

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2-2 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5	7
2-3 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเก้าถ่านหินลิกไนต์แม่เกาะระหว่าง ปี พ.ศ. 2528 – 2544.....	18
2-4 คุณสมบัติทางเคมีของเก้าถ่านหินตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. 1014	19
2-5 คุณสมบัติทางกายภาพของเก้าถ่านหินตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014	20
2-6 ความชื้นเหลือปกติและการก่อดั้วของเพสต์ผสมเก้าถ่านหิน	21
2-7 ความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเก้าถ่านหินแม่เกาะ.....	22
2-8 ปริมาณน้ำที่สามารถปรับลดได้สำหรับคอนกรีตที่ใช้เก้าถ่านหิน	23
2-9 กำลังของคอนกรีตผสมเก้าถ่านหินแม่เกาะ	24
3-1 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุม.....	37
3-2 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา.....	37
3-3 อายุของมอร์ต้าร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้	43
3-4 ส่วนผสมคอนกรีตควบคุม	45
3-5 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ต่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา.....	45
4-1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	45
4-2 ความชื้นเหลือปกติ เวลาการก่อดั้วเริ่มต้นและก่อดั้วสุดท้าย	51
4-3 ค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์เทียบกับอายุ 3 วัน ของทุกส่วนผสม	59
4-4 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเก้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา	64
4-5 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต	72
4-6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเก้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน	75
4-7 ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน	79

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 แคลเซียมซิลิเกต C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF	8
2-2 ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว	8
2-3 แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไกต์	9
2-4 เอททริงไกต์ และ Monosulfate.....	9
2-5 ปฏิกริยาระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ.....	10
2-6 ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ	10
2-7 การเกิดของอูณหภูมิในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและซีเมนต์.....	11
2-8 การก่อสร้างเขื่อนภูมิพลที่จังหวัดตาก	12
2-9 เถ้าถ่านหินขนาดเล็กโดยเครื่องทดสอบ SEM ปี 2558	16
2-10 กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผสมเถ้าถ่านหิน	24
2-11 โซดาไฟ หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$).....	25
2-12 ความสัมพันธ์ของความหนืดพลวัตกับความเข้มข้นของด่าง $NaOH$	27
2-13 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินกับด่างแรงปฏิกิริยา $NaOH$	28
2-14 ซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ตรวจสอบโดย SEM.....	28
3-1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	32
3-2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	34
3-3 การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังอัด.....	41
3-4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	44
3-5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	44
3-6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างมอร์ตาร์	44
3-7 ตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัวนำไปทดสอบกำลังอัด.....	48
3-8 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยเครื่อง Universal Testing Machine	48
4-1 ภาพขยายของเถ้าถ่านหินแม่เหมาะสมชนิด F โดยใช้เครื่อง SEM ปี 2558	49
4-2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย $NaOH$ ต่อความต้องการน้ำของเพสต์	53

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-3 ผลของปริมาณเถ้านหินต่อความต้องการน้ำของเพสต์	54
4-4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการก่อตัวของเพสต์	55
4-5 ผลของปริมาณเถ้านหินต่อการก่อตัวของเพสต์	57
4-6 การพัฒนากำลั้งอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุบ่มของมอร์ต้าร์	61
4-7 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลั้งอัดของมอร์ต้าร์	65
4-8 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลั้งอัดของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม	67
4-9 ผลของปริมาณเถ้านหินต่อกำลั้งอัดของมอร์ต้าร์	69
4-10 การยุบตัวของคอนกรีต.....	73
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลั้งอัดของคอนกรีตกับอายุบ่มคอนกรีต	76
4-12 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลั้งอัดของคอนกรีต	80
4-13 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลั้งอัดของคอนกรีต เทียบกับ กลุ่มควบคุม	82
4-14 ผลของปริมาณเถ้านหินต่อกำลั้งอัดของคอนกรีต	85

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีตเริ่มแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีฐานข้อมูลงานวิจัยที่ยืนยันตรงกันว่า วัสดุปอชโซลานที่มีคุณภาพดีบางตัว นอกจากจะส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตต่ำลง ยังมีผลทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านต่าง ๆ ดีขึ้น เช่น ความคงทน การลดความร้อนเพื่อป้องกันการแตกร้าวในคอนกรีต และการป้องกันการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นต้น (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีระชาติ ตั้งจิรภัทร, 2554) นอกจากนี้ วัสดุปอชโซลานหลายชนิดยังเป็นผลพลอยได้ หรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนลดปัญหาการกำจัดทิ้งของวัสดุเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีตยังเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีระชาติ ตั้งจิรภัทร, 2551) เนื่องจากวัสดุปอชโซลานได้ใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้การผลิตปูนซีเมนต์ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอาจมีแนวโน้มลดลงด้วย อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลาน มีข้อด้อยในส่วนของกำลังอัดระยะต้นที่ต่ำ ตลอดจนวัสดุปอชโซลานบางตัวมีอนุภาคที่หยาบ ซึ่งจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานได้ช้า และให้กำลังอัดที่ต่ำในช่วงต้น จึงเป็นเหตุที่วัสดุปอชโซลานหลายตัวไม่ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น เถ้าชีวภาพต่าง ๆ ได้แก่ เถ้ากลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย เถ้ากลบเปลือกไม้ เป็นต้น เพราะเถ้าดังกล่าวถึงแม้จะมีซิลิกา และอลูมินาสูง แต่มีอนุภาคที่หยาบ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานได้ไม่สมบูรณ์ และจำเป็นต้องผ่านการบดให้ละเอียดก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นหากสามารถหาวิธีเร่งปฏิกิริยาปอชโซลานให้เร็ว และสมบูรณ์มากขึ้น ก็จะทำคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานมีกำลังอัดที่สูงในระยะต้น ซึ่งขดเชยข้อด้อยของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานได้ ตลอดจนเป็นการพัฒนาวัสดุปอชโซลานบางตัว ซึ่งมีอนุภาคหยาบ เช่น เถ้าชีวะมวลที่ไม่สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้โดยตรงให้สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการบดให้ละเอียด และวัสดุปอชโซลานที่มีคุณภาพดีอยู่แล้ว ก็อาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นได้

การใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงผสมในวัสดุปอซโซลาน จะสามารถชะเอาซิลิกา และอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานออกมาได้ เป็นหลักการเดียวกันในกระบวนการผลิตวัสดุอิพอลิเมอร์ โดยซิลิกา และอลูมินาถูกชะออกมาทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (CAH) ที่เป็นสารที่ให้ง่ายกับคอนกรีต โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังนั้นการศึกษานี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ด่างที่มีความเข้มข้นต่างกันในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์ และคอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณที่ต่างกันเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินให้สามารถใช้งานได้ดี โดยใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูง เพื่อเป็นการใช้วัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมให้สามารถใช้งานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณเถ้าถ่านหินต่อความชื้นเหลวปกติ การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
3. เพื่อศึกษาการทำคอนกรีตโดยใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูง และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดและค่าการยุบตัวของคอนกรีต ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหิน โดยใช้ฐานข้อมูลจากผลการทดสอบในมอร์ตาร์ และซีเมนต์เพสต์

ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษานี้ใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ โดยแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างเร่งปฏิกิริยา ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ทำการทดสอบสมบัติของเพสต์ ได้แก่ ค่าความชื้นเหลวปกติตามมาตรฐาน ASTM C187 ระยะการก่อตัวระยะต้น และระยะสุดท้ายตามมาตรฐาน ASTM C191 ทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์

ได้แก่ การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C230 เตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ เพื่อทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยบ่มตัวอย่างในน้ำ ก่อนทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน นอกจากนี้ได้ศึกษาการทำคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูง และใช้สารละลาย NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ โดยใช้ฐานข้อมูลการศึกษาในมอร์ตาร์ที่ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดี โดยจะหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³ เพื่อทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ทราบถึงผลของการใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในวัสดุประสานที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูงต่อสมบัติของ ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ได้แก่ ความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาการก่อตัว การยุบตัว และค่ากำลังอัด
2. เพื่อให้ทราบส่วนผสมที่เหมาะสมของของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูง โดยใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความเหมาะสมทั้งด้านความแข็งแรง และประหยัดตามหลักวิศวกรรม

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในบทที่ 2 กล่าวถึง วัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลาน บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย และลำดับขั้นตอนในการศึกษาวิจัย บทที่ 4 เป็นผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และส่วนสุดท้ายคือ บทที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง และข้อเสนอแนะที่ควรจะศึกษาเพิ่มเติมต่อไป นอกจากนี้ยังมีเอกสารอ้างอิงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้นคว้า และสุดท้ายคือ ภาคผนวก ซึ่งแสดงข้อมูลของความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาการก่อตัว ค่าการไหลแผ่ การยุบตัว และค่ากำลังอัดที่อายุต่าง ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับคอนกรีต ปฏิกิริยาไฮเดรชัน วัสดุปอชโซลาน ปฏิกิริยาปอชโซลาน สถานะของซิลิกาในเถ้านหิน ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด การทำปฏิกิริยาของเถ้านหิน ความร้อนของปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ผสมเถ้านหิน เถ้านหิน ชนิดต่าง ๆ ผลกระทบของเถ้านหินของคอนกรีตสด ผลกระทบของเถ้านหินที่แข็งตัวแล้ว ข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตผสมเถ้านหิน

ทฤษฎีเกี่ยวกับคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์กับวัสดุผสม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ และวัสดุปอชโซลาน หิน ทราช และน้ำ ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ให้ได้ความชื้นเหลวพอเทได้ และสะดวกแก่การใช้งาน เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งน้ำ และซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยซีเมนต์ จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่น และแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่าคอนกรีต (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่ผสมและยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่

1. ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานคุณสมบัติของ ปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบของวัตถุดิบจะทำปฏิกิริยากัน ในขั้นตอนการเผาการปรับส่วนประกอบทางเคมีจะให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติต่างกัน เมื่อผสมกับน้ำ ปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาและเกิดการก่อตัวและแข็งตัว การผสมเถ้านหินจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เปลี่ยนแปลง

2. ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน ASTM C150 และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์

อุตสาหกรรมของประเทศไทย มอก. 15 แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ คือ

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

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland cement) ใช้สำหรับ การทำคอนกรีตที่ต้องการลดอุณหภูมิเนื่องจากสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูง งานคอนกรีตเหลาหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้าง เขื่อนคอนกรีต กำแพงดินหนา ๆ หรือท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ๆ ต่อม่อ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเขียว

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความแข็งแรงสูงโดยเร็ว (High early strength Portland cement) ปูนซีเมนต์ให้กำลังสูงในระยะแรกมีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา มีประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่จะต้องใช้งานเร็ว หรือรีบอบได้เร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้น และคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนประเภทนี้ ได้แก่ ปูนตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง และตราสามเพชร

2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดความร้อนต่ำ (Low heat Portland cement) สามารถลดปริมาณความร้อนเนื่องจากการรวมตัวของปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งจะสามารถลด การขยายตัวและหดตัวของคอนกรีตภายหลังการแข็งตัว ใช้มากในการสร้างเขื่อน เนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่างานชนิดอื่นไม่เหมาะสำหรับโครงสร้างทั่วไปเพราะแข็งตัวช้า

2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Sulphate resistance Portland cement) ชนิดทน ซัลเฟต ได้สูง ใช้ในบริเวณที่น้ำหรือดิน มีค่าต่างสูง มีระยะการแข็งตัวช้า และมีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม

วัสดุชนิดนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษปูนซีเมนต์แลนด์ ประกอบด้วยหินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และ โกลโคไมต์ ($MgCo_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในที่ใช้กัน

ทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด โดยจะเกิดเป็นสารประกอบหลักสำคัญ 4 ชนิด เช่น ไตรแคลเซียมซิลิเกต, ไดแคลเซียมซิลิเกต, ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต, เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ จะอยู่ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก โดยมีส่วนประกอบทางเคมีและชื่อย่อ ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

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

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัว และแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ สารประกอบ และคุณสมบัติบางประการ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-2

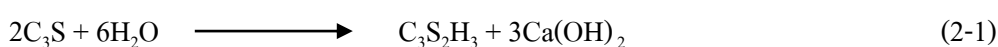
ตารางที่ 2-2 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5
(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

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

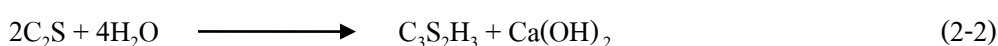
3. ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

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

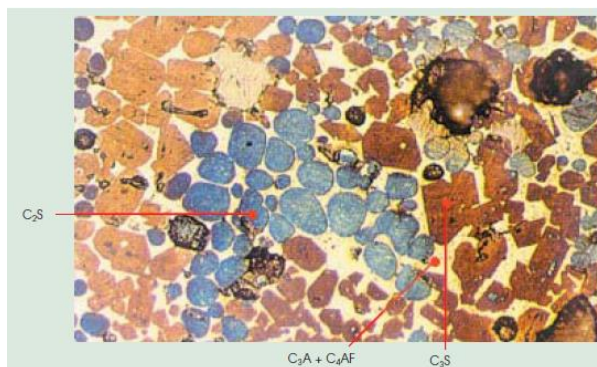
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S)



ในทันทีที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จะมีลักษณะเป็นรู้น ยังไม่แข็งตัวแต่ละจะค่อย ๆ แข็งตัว และมีการพัฒนากำลังเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น องค์ประกอบด้วยรวมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ผลึก C_3S ในเม็ดปูนซีเมนต์โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope ขยาย 3,000 เท่า ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-1 แคลเซียมซิลิเกต C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF (Shetty, 1982)



ภาพที่ 2-2 ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

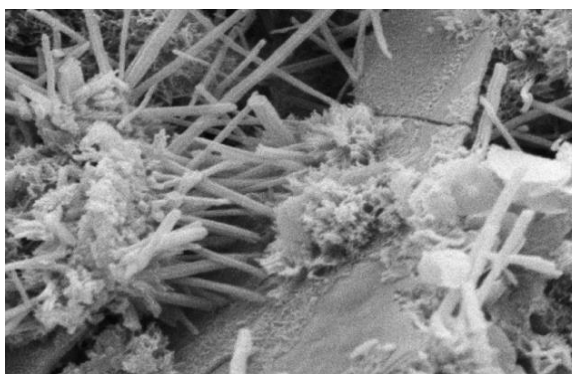
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

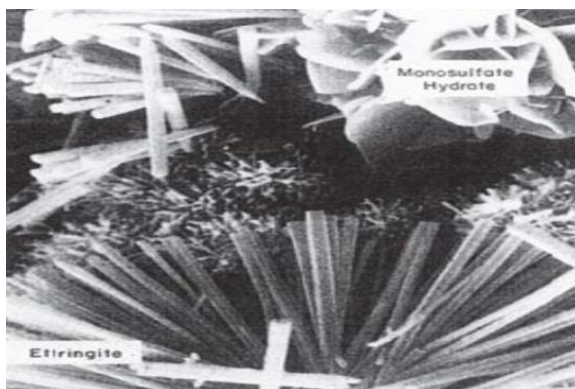


ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไปเพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตไม่ให้เกิดเร็วเกินไป เพราะเมื่อไตรแคลเซียมอลูมิเนตทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟตจะได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไทต์ (Ettringite) ดังภาพที่ 2-3 ทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง



ภาพที่ 2-3 แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไทต์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

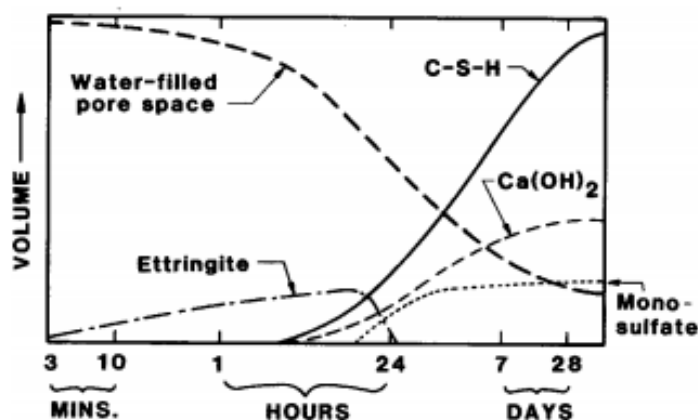
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) นี้จะเกิดในช่วงต้นโดยเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคเหมือนเข็มของเอททริงไทต์ (Ettringite) ดังภาพที่ 2-4



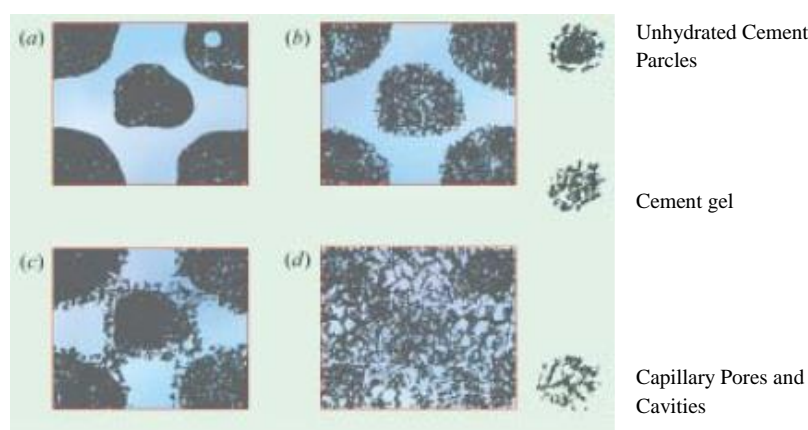
ภาพที่ 2-4 เอททริงไทต์ และ Monosulfate (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

4. ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่านหิน

ส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการไฮเดรชันดังภาพที่ 2-5 แสดงถึงปฏิกิริยาของเม็ดปูน เริ่มต้นจากเม็ดปูนเมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้ผลิตผลไฮเดรชัน 2 ส่วน ส่วนแรก ได้แก่ ผลิตผลภายนอก (Outer product) เกิดขึ้นรอบเม็ดปูน และจะขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่าง และส่วนที่สอง ได้แก่ ผลิตผลภายใน (Inner product) เกิดขึ้นที่ผิว และเข้าสู่ภายในเม็ดปูน ผลิตผลโดยรวมเรียกว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) นอกจากนั้นยังประกอบ ด้วยเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโพรงคาปิลารี (Capillary pore) และโพรงอากาศอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2-6

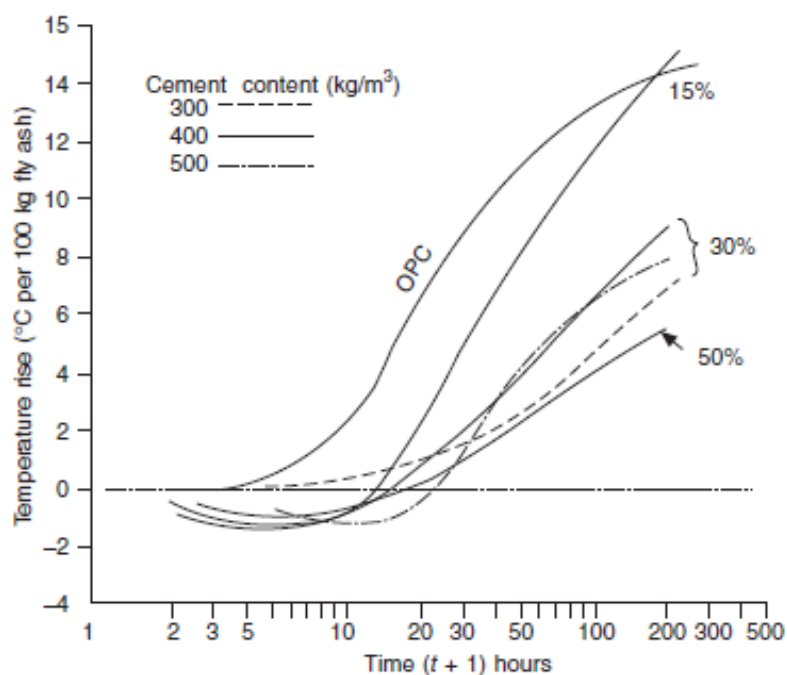


ภาพที่ 2-5 ปฏิกิริยาระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ (ACI255R-99, 2000)



ภาพที่ 2-6 ผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างเม็ดปูนกับน้ำ (Shetty, 1982)

การใส่เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ปริมาณสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุกตัว เช่น ไตรแคลเซียมซัลไฟเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซัลไฟเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) ในคอนกรีตลดลง จะทำปฏิกิริยาช้าลง มีการคายความร้อนจากปฏิกิริยาชะลอตัวออกไปดังแสดงในภาพที่ 2-7 โดยอุณหภูมิที่เล็ก และทรงกลมทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างดีในเพสต์ อุณหภูมิที่เล็กสามารถเป็นตัวแทรกเข้าไปในช่องว่างทำให้เพสต์แน่นขึ้น และยังทำให้เกิดแหล่งสำหรับการตกผลึกของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น (Gopalan, 1993)



ภาพที่ 2-7 การเกิดของอุณหภูมิในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและซีเมนต์ (Jonh & Ban, 2003)

การใช้วัสดุพอชโซลาน

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าถ่านหินลิกไนต์ ประเทศไทยได้เริ่มเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว (ประจิด จริปภา, 2526) ได้เสนอผลงานวิจัยคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ของประเทศไทย ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2523 และ 2526 นอกจากนี้ ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร (2528) ได้นำเสนอ ผลงานวิจัยในปี พ.ศ. 2527 และ 2528 ต่อมาการวิจัยด้านนี้ได้ขยายกว้างขึ้น และในปี พ.ศ. 2535 ได้มีการนำเถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เกาะประมาณ 1 แสนตัน มาผลิตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานฐานรากขนาด 30,000 ตรม. เพื่อรองรับน้ำหนักของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมด ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแทนการใช้เสาเข็มเจาะรับน้ำหนัก และไม่พบการทรุดตัวถึงปัจจุบัน

จากการสนับสนุนการวิจัยโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทำให้เริ่มมีการนำเถ้าถ่านหินไปใช้งาน การวิจัยภายในประเทศนี้มากพอที่จะเป็นฐานข้อมูลในการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ อย่างจริงจัง และเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติอย่างมาก ส่งผลให้ “กลุ่มพัฒนาเถ้าถ่านหินลิกไนต์ นำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในประเทศไทย” ได้รับรางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่นปี พ.ศ. 2545 จากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ นอกจากนี้งานวิจัยด้านเถ้าถ่านหินของไทยยังสามารถลงตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของนักวิจัยไทย และนอกจากนี้เถ้าถ่านหินถูกนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อใช้ในการก่อสร้างเขื่อนภูมิพลที่จังหวัดตากอีกด้วย ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 การก่อสร้างเขื่อนภูมิพลที่จังหวัดตาก (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

วัสดุปอซโซลาน

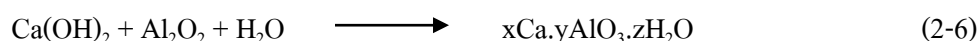
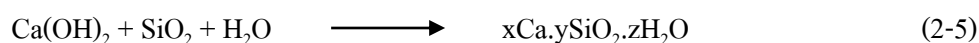
วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในคอนกรีต ในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวิรัชชาติ ตั้งจิรภัทร, 2551) เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น โดยทั่วไปการใช้วัสดุปอซโซลานสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง และส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุปอซโซลานบางชนิดที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาแพง เช่น ซิลิกาฟูม ในขณะที่ประเทศไทยมีวัสดุปอซโซลานหลายชนิดที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้ เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ เป็นต้น และเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ว วัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) วัสดุปอซโซลาน ที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Matakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งในด้านของการรับกำลังอัด ความคงทนต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดส่งผลดีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพ โดยเฉพาะความละเอียดเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

นอกจากเถาถ่านหินและเถาชีวมวลจะถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตแล้วยังถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ เช่น คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง และการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร เป็นต้น เนื่องจากดินบางประเภทไม่เหมาะที่จะใช้ในงานด้านวิศวกรรมจึงต้องปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสม เช่น ใช้เถาถ่านหินในการถมที่แทนดินลูกรังเพราะเมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งแรงและยุบตัวน้อยกว่า อาจใช้เป็นวัสดุก่อสร้างดินถมเพื่อก่อสร้างถนนซึ่งสามารถรับน้ำหนัก และกระจายน้ำหนักบรรทุกได้ดี การก่อสร้างฐานรากอาคารที่ฝังอยู่ใต้ดินช่วยลดการทรุดตัวหรือจะใช้ทำเสาเข็มเจาะ เพื่อถ่ายน้ำหนักกดจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรง

ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันมาทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา (ปริญญา 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 เป็นการทำให้ปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของซิลิกาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และสมการที่ 2-5 เป็นการทำให้ปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของอลูมินาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ให้กำลังกับคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ เพราะมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

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

1. ทางกายภาพ การทำปฏิกิริยาของเถาถ่านหินจะเพิ่มมากขึ้นและเร็วขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของเถาถ่านหินสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการบดเถาถ่านหิน (Kiattikomol, Jaturapitakkul, Songpiriyakij, & Chutibtim, 2001)

2. ทางเคมี สามารถทำได้โดย 2 วิธี คือ การปรับปรุงผิวเถาถ่านหิน (Surface treatment) และ การใช้สารเคมีผสม เป็นวิธีที่นิยมมาก เนื่องจากทำได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง แบ่งเป็น 2

กลุ่ม คือ กลุ่มซัลเฟต และกลุ่มอัลคาไล (Saraswathy, Muralidharan, Thangavel, & Srinivasan, 2003)

3. การใช้ความร้อน คือ การให้ความร้อนคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทำให้เถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตสูงขึ้น (Bamforth, 1980) นอกจากนี้การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี Ca(OH)_2 และ CaSO_4 สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดี

เถ้าถ่านหิน

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

1. ชนิดของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1.1 ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสมีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึง ให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

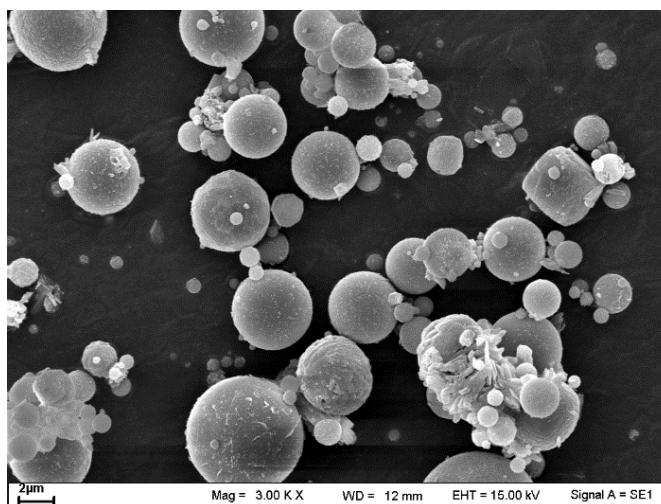
1.2 ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้ เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียวโดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำ

ทำให้เม็ดถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำ แล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

เม็ดถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เม็ดถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เม็ดถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเม็ดถ่านหินแคลเซียมสูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเม็ดถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 10

2. รูปร่างและลักษณะของเม็ดถ่านหิน

เมื่อเม็ดถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาป และหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เม็ดถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เม็ดถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลม และอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy phase) เม็ดถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเม็ดถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เม็ดถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เม็ดถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า จะมีทรงกลมและผิวเรียบ ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 เม็ดถ่านหินขนาดเล็กโดยเครื่องทดสอบ SEM ปี 2558

เม็ดถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่า ซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเม็ดถ่านหิน และยังมีเม็ดถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเม็ดถ่านหินเล็ก ๆ อยู่ภายใน เรียกว่า พลีโรสเฟีย (Plerosphere)

แก้วถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของแก้วถ่านหินกลวง คือ แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate glass) เนื่องจากแก้วถ่านหินกลวงเป็นแก้วถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำแก้วถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง (Acoustic)

แก้วถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และผิวขรุขระ เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนแก้วถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหินจึงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน (ชัย จาคูพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2554)

3. ขนาดและความละเอียด

อนุภาคแก้วถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน แก้วถ่านหินเหมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับ ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของแก้วถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยแก้วถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 - 5,000 ซม.²/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธีของ BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของแก้วถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้ วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุน และที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 - 89,000 ซม.²/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.²/ก.

การวัดความละเอียดของแก้วถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet sieve) ผ่านบน ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 แนะนำให้ ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวน แก้วถ่านหินที่ค้ำบน ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 แก้วถ่านหิน โดยทั่วไปมีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และอาภา เสาวภาคย์, 2550)

4. ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของแก้วถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับ ปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C188 แก้วถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.90-2.90 (Rilem, 1991) ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของแก้วถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็ก และแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของ

เถาถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกัน ยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถาถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถาถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถาถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรง และยังมีเถาถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถาถ่านหินละเอียด (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2554)

5. ความต้องการน้ำ

มาตรฐาน ASTM C618 ระบุความต้องการน้ำของส่วนผสมที่มีเถาถ่านหินสูงสุดเท่ากับร้อยละ 105 ของส่วนผสมควบคุม โดยมาตรฐาน ASTM C311 ให้ใช้ส่วนผสมเดียวกันกับที่ใช้สำหรับการทดสอบดัชนีการพัฒนากำลัง เถาถ่านหินมีรูปร่างกลม จะทำให้ส่วนผสมมีความสามารถทำงานได้หรือมีความลื่นไหลได้ดีขึ้น ทำให้มีความต้องการน้ำต่ำกว่าส่วนผสมควบคุม แสดงให้เห็นว่าเถาถ่านหินมีผิวขรุขระ และไม่กลมจึงไม่เหมาะที่จะเอามาใช้งาน

6. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินขึ้นอยู่กับชนิดของเถาถ่านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 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 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถาถ่านหินลิกไนต์แม่เมาระหว่างปี

พ.ศ. 2528–2544 (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

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 เพราะคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินต้องอาศัยค่าที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และต้องการความชื้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

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 แต่ต้องมีผลการทดสอบด้านอื่นจากห้อง
ทดสอบประกอบ เพื่อแสดงว่าเถ้าถ่านหินดังกล่าวสามารถใช้ได้

ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินตามมาตรฐาน 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

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีต เช่น อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน การพัฒนาโครงสร้างกำลังรับแรง และความทนทานเปลี่ยนไป เนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีต เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเพสต์ และมอร์ตาร์

1. ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสด

การใส่เถ้าถ่านหินทดแทนปูนซีเมนต์จะทำให้คุณสมบัติบางประการของคอนกรีตเปลี่ยนไป เช่น ความต้องการน้ำ ความสามารถในการทำงานได้ ระยะเวลาการก่อตัว และการเยิ้ม น้ำ ความต้องการน้ำจะคู่กับการใช้วัสดุปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยจะมี ความสามารถในการทำงานได้ที่แตกต่างกัน

1.1 ความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์

นิยมใช้ความชื้นเหลือปกติตามมาตรฐาน ASTM C187 สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจะไม่แตกต่างกันมากนักโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของเถ้าถ่านหิน รูปร่างกลม ผิวเรียบ จะทำให้เพสต์ ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น และทำให้ความชื้นเหลือปกติของเพสต์ลดลง โดยข้อมูล การทดสอบจะแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ความชื้นเหลือปกติและการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน (ธีรทรัพย์ รัตนภาส, 2545)

ส่วนผสม	ความชื้นเหลือปกติ (%)	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

1.2 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

การวัดความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์จะใช้การวัดค่าการไหลแผ่นตามมาตรฐาน ASTM C109 ค่าการไหลแผ่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจะขึ้นอยู่กับปริมาณและความละเอียดของเถ้าถ่านหิน การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินทำให้ส่วนผสมลื่นไหลได้ดีขึ้น ลดความต้องการน้ำลงได้ ดังแสดงในตารางที่ 2-7 (Chindapasirt, Homwuttivong, & Sirivivatnanon, 2003)

การใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดมากจะลดน้ำได้ไม่มากนัก เนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูง ทำให้ต้องการน้ำมาเคลือบผิวมากขึ้น

ตารางที่ 2-7 ความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (Chindapasirt, Homwuttiwong, & Sirivivatnanon, 2004)

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
เถ้าถ่านหินผ่านร่อน 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

1.3 ความต้องการน้ำของคอนกรีต

การวัดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตนิยมใช้การวัดค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C143 ที่ค่ายุบตัวเท่ากัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะใช้น้ำต่ำกว่า เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบ ทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้นและต้องการน้ำจะลดลง (Chindapasirt et al., 2003) สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา ACI 318-99 ได้แนะนำให้ปรับลดปริมาณน้ำ สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินดังแสดงในตารางที่ 2-8 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ทุกร้อยละ 10 สามารถลดปริมาณน้ำได้ประมาณ 5 กิโลกรัม/ลบ.ม. แต่การใช้เถ้าถ่านหินหยาบที่มีปริมาณข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 สูงมากทำให้คอนกรีตต้องการน้ำเพิ่มได้ (Owens, 1979)

ตารางที่ 2-8 ปริมาณน้ำที่สามารถปรับลดได้สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน (ACI 318, 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

2.1 การบ่มคอนกรีต

ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นช้า และใช้เวลานาน ดังนั้นการบ่มจึงมีความสำคัญต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การบ่มสามารถใช้การบ่มน้ำปกติ และการบ่มชื้นร่วมกับความร้อน คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทิ้งไว้ในอากาศโดยไม่ได้บ่มด้วยน้ำหรือความชื้น จะมีกำลังรับแรงที่อายุ 7 วันของคอนกรีตเดียวกันบ่มชื้น (Gopalan, 1993) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องบ่มคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินนานกว่าคอนกรีตธรรมดา

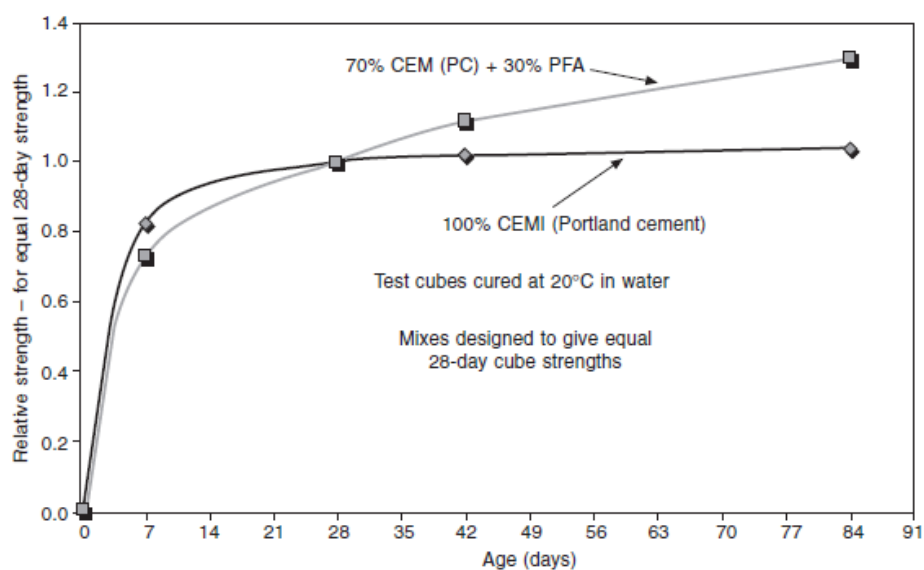
2.2 กำลังรับแรงของคอนกรีต

กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่อายุต้นจะลดลงตามปริมาณเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น (Chindaprasirt et al., 2003) ดังแสดงในตารางที่ 2-9 เนื่องจากปฏิกิริยาในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ เมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะดีขึ้นเมื่อเทียบกับ คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่มากเกินไป กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนาได้ดี และสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าถ่านหิน (Malholtra & Rameszaniapour, 1994) โดยปกติเวลาที่ใช้ในการพัฒนาจะนานประมาณ 1-6 เดือน ดังแสดงในภาพที่ 2-10 (Samarin, Munn, & Ashby, 1983)

ตารางที่ 2-9 กำลังของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (Chindapasirt et al., 2003)

ส่วนผสม OPC:FA	การยวบตัว (มม.)	กำลังอัด (เมกะปาสคาล)		
		3 วัน	7 วัน	28 วัน
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



ภาพที่ 2-10 กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผสมเถ้าถ่านหิน (Samarin et al., 1983)

โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซดาไฟ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังภาพที่ 2-11 มีสถานะเป็นของแข็งสีขาว หรืออาจอยู่ในรูปของเหลวที่เป็นสารละลาย ถือเป็นสารเคมีที่มีความสำคัญมากในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันมีจำหน่ายทั้งในสถานะของแข็ง และของเหลว บางครั้งเรียกกันว่า ผงมัน ส่วนในรูปสารละลายมักพบความเข้มข้นร้อยละ 50



ภาพที่ 2-11 โซดาไฟ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซดาไฟก้อน เป็นสถานะปกติของโซดาไฟที่อยู่ในรูปของแข็ง มีลักษณะเป็นผลึก หรือผงสีขาวมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเมื่อละลายน้ำจะให้ฤทธิ์เป็นด่างแก่ใช้มากในภาคอุตสาหกรรม และมีใช้บ้างในภาคครัวเรือน และการเกษตร

1. ลักษณะเฉพาะของโซดาไฟ

- 1.1 เป็นก้อนผลึกหรือผงสีขาว
- 1.2 ละลายน้ำได้ด่างแก่
- 1.3 มวลอะตอมเท่ากับ 40 กรัม/โมล
- 1.4 ความหนาแน่น 2.1 กรัม/ซม.³ ที่ 20 องศาเซลเซียส
- 1.5 จุดหลอมเหลวที่ 318 องศาเซลเซียส
- 1.6 จุดเดือดที่ 1390 องศาเซลเซียส
- 1.7 ความสามารถในการละลายน้ำ 111 กรัม/10 มล.

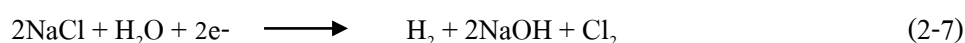
โซดาไฟเหลว เป็นผลิตภัณฑ์ของโซดาไฟที่อยู่ในรูปของเหลวที่ละลาย อยู่ในตัวทำละลาย (น้ำ) มีฤทธิ์เป็นด่างไม่มีกลิ่นแต่สามารถเกิดไอระเหยได้ เมื่อสัมผัสจะ ลื่นเหมือนสบู่ พบจำหน่ายมากในปัจจุบัน ได้แก่ โซดาไฟร้อยละ 32 และ 50 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้มากในภาคอุตสาหกรรม

2. การผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.1 การผลิตจากสารละลาย NaCl หรือเกลือแกง

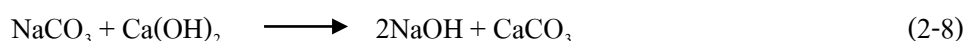
ด้วยหลักการอิเล็กโทรไลซิสของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ เมมเบรนเซลล์

(Membrane cell) และไดอะแฟรม เซลล์ (Diaphragm cell) โดยการนำเกลือมาแยกด้วยกระแสไฟฟ้ากระแสตรงทำให้เกิดก๊าซคลอรีน และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำในเซลล์จนเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคลอรีน ดังสมการที่ 2-7



2.2 การผลิตจากปูนขาว

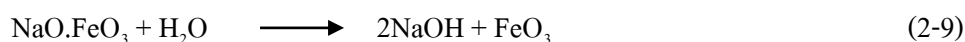
ด้วยการละลายโซดา (Na_2CO_3) ในน้ำปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการที่ 2-8



โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะระเหยตัวออก และไหลเข้าสู่ท่อเหล็กเย็นเพื่อกลั่น ซึ่งจะมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 92

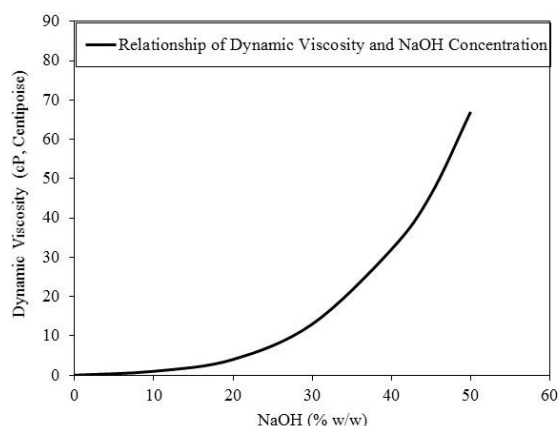
2.3 การผลิตจากสารประกอบเฟอร์ไรท์

สารประกอบเฟอร์ไรท์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ $\text{NaO} \cdot \text{FeO}_3$ จากการเตรียมด้วยสารประกอบเฟอร์ไรท์กับผงโซดาที่อุณหภูมิ 1,100 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และเข้าสู่กระบวนการชะด้วยน้ำจนได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และตะกอนสารประกอบเฟอร์ไรท์ ดังสมการ 2-9



3. สมบัติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ทั่วไปเรียกว่า โซดาไฟ มีมวลของโมเลกุลเท่ากับ 40 และสำหรับร้อยละ 50 ของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีความหนืดพลวัตมีค่าเท่ากับ 78 cP (Centipoise) แต่สำหรับน้ำเปล่าจะมีค่าความหนืดพลวัตเท่ากับ 1.00 cP ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความสัมพันธ์ของความหนืดพลวัตจะเปลี่ยนตามความเข้มข้นของด่าง NaOH ดังแสดงในภาพที่ 2-12



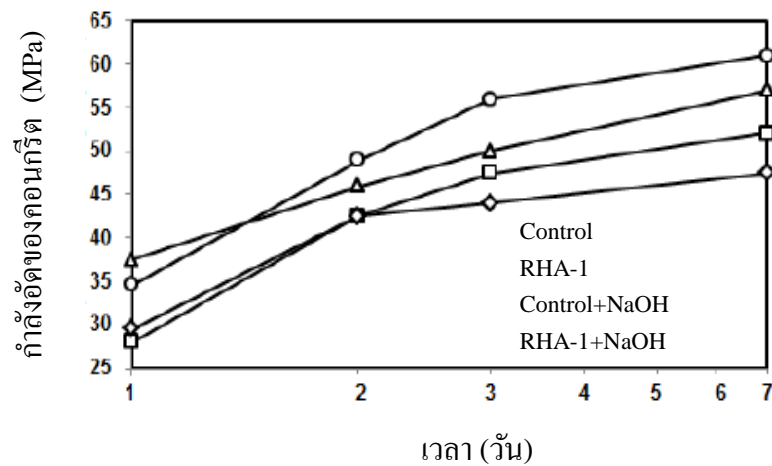
ภาพที่ 2-12 ความสัมพันธ์ของความหนืดพลวัตกับความเข้มข้นของด่าง NaOH

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชะซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุปอซโซลาน

การใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาเป็นวิธีที่นิยมใช้ ที่แปลงโครงสร้างคลายกระจกไป เป็นโครงสร้างที่แน่น (Palomo, Grutzeck, & Blanco, 1999b) การเติมสารด่างเร่งปฏิกิริยาเพื่อไปทำลายพันธะของ Si-O และ Al-O ของโครงสร้าง Slag และเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของซิลิกาไอออน อะลูมินากับเพสต์ของเหลว สารเคมีบางชนิดได้ถูกใช้อย่างมากกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา เช่น $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH และ KOH เป็นต้น (Wu, Jiang, & Roy 1990)

Puertas, Martinez-Ramirez, Alonso, & Vazquez, (2000) การศึกษาการเร่ง ปฏิกิริยาโดยใช้ NaOH กับเพสต์ที่ผสมระหว่างเถ้าถ่านหินและตะกรันเตาถลุงเหล็กปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา 2 และ 10 โมลาร์ ทำการบ่มในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 65 องศาเซลเซียส และปริมาณ Fly ash/Slag (100/0, 70/30, 50/50, 30/70 และ 0/100) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 และตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 กับการใช้สารเร่ง NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์ บ่มในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีการพัฒนากำลังอัดถึง 50 เมกะปาสกาล และมีแนวโน้มนี้ การใช้ปริมาณของ Slag เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะเพิ่มขึ้น และการพัฒนากำลังอัดขึ้นอยู่กับปริมาณของการใช้ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา NaOH และกำลังสูงก็ได้มาจากการใช้ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์

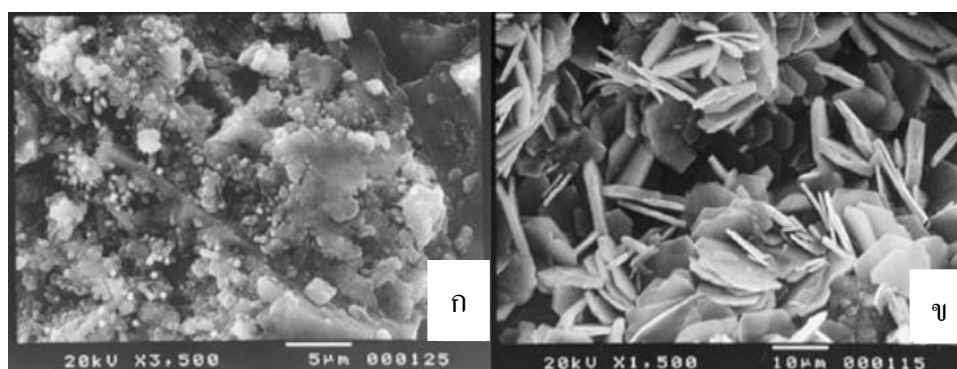
Paya, Monzo, Borrachero, Peris-Mora, & Ordonez, (2000) ได้ศึกษาการใช้เถ้าเคลบที่มีด่างเร่งปฏิกิริยาเป็น NaOH ผลที่ได้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วันเพิ่มขึ้น เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่อายุเพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 7 วัน กลับพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้ใส่สารเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าจุดไม่ดีของการใช้สาร ดังภาพที่



ภาพที่ 2-13 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบกับด่างเร่งปฏิกิริยา NaOH
(Paya, Monzo, Borrachero, Peris-Mora, & Ordonez, 2000)

Martinez and Palomo (2001) ได้ศึกษาการใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา พบว่าโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) ของคอนกรีตได้เปลี่ยนแปลงไปเป็น โครงสร้างคล้าย โครงกระดูก (Skeletal structure) และการเกิดของเจลของพอลิเมอร์ (Geopolymeric gel) ขึ้นอยู่กับการใช้ปริมาณของด่างที่สูง เจลถูกผลิตเมื่อสารละลายของด่างเร่งที่มีความเข้มข้นสูง เริ่มทำปฏิกิริยากับวัสดุตั้งต้น ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีสมบัติเชิงกลที่ดีในช่วงต้น ๆ ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 ซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ตรวจสอบโดย SEM. (ก) ปฏิกิริยา Hydration กับน้ำธรรมดา
(ข) ปฏิกิริยา Hydration กับการใช้ด่างสารละลาย NaOH (Martinez & Palomo, 2001)

Kejin, Surendra, and Alexander (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 องศาเซลเซียส, 38 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า การบ่มที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส 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 พบว่ากำลังเพิ่มขึ้นที่อายุเริ่มต้นเมื่อบ่มในอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส หรือ 38 องศาเซลเซียส การศึกษาพบว่ากำลังอัดที่อายุ 56 วัน มีค่าเท่ากับ 27 เมกะปาสคาล ที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อ Cement Kiln dust (CKD) เท่ากับ ร้อยละ 50 และใช้ NaOH ร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 38 องศาเซลเซียส

Bahadure and Naik (2013) ได้ศึกษาความเหมาะสมของปริมาณเถ้าแกลบ ที่เป็นวัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต เพื่อไปปรับปรุงกำลังอัด ระยะต้น โดยมี การใช้ 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) หรือการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานช้า
2. สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 3, 7 และ 14 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเพิ่มขึ้น เพราะเป็นช่วงของการชะลิ้ก้าออกมา หรือน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยามีปริมาณมากเกินไป
3. แต่สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 3 วัน จะพบว่ากำลังของคอนกรีต เพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 1 โมลาร์ เพราะว่าเป็นช่วงของปฏิกิริยาของปอชโซลานที่มีลิ้ก้า เป็นตัวทำปฏิกิริยา
4. สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 ที่อายุ 3, 7 และ 14 วัน กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา NaOH ที่มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เพราะเป็นช่วงเวลาการทำปฏิกิริยาปอชโซลาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแก่่า่านหิน

Ubolluk and Prinya (2009) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการชะของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากแก่่า่านหินลิกไนต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และผลที่มีต่อกำลังอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์ โดยทำตัวอย่างแก่่า่านหินให้เป็นสารแขวนลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน และนำสารละลายที่ระยะเวลาการชะต่างกัน ไปวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาและอะลูมินา นอกจากนี้ได้ทำ การทดสอบกำลังอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการชะละลายของแก่่า่านหินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการชะ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นปานกลาง คือ 10 โมลาร์ และเวลาในการชะ 10 นาทีให้กำลังอัดที่สูง สามารถทำวัสดุอีโพลิเมอร์ที่ให้กำลังอัดสูงถึง 65 เมกะปาสกาล ซึ่งเทียบได้กับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และวิเชียร ชาลี. (2553) ได้ศึกษากำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของอีโพลิเมอร์คอนกรีตจากแก่่า่านหิน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของอีโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างอีโพลิเมอร์ คอนกรีตกับเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

ปริญญา จินดาประเสริฐ (2555) ได้ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออีโพลิเมอร์คอนกรีต ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของอีโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 19.89 ถึง 42.91 เมกะปาสกาล ที่ 7 วัน และกำลังอัดของอีโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน อยู่ระหว่าง 33.80 ถึง 54.40 เมกะปาสกาล กำลังดึงแบบผ่าซิก อยู่ระหว่าง 3.07 ถึง 4.91 เมกะปาสกาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่อายุ 28 วัน อยู่ระหว่าง 22.40 ถึง 38.40 เมกะปาสกาล กำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 28 วัน อยู่ระหว่าง 8.30 ถึง 10.96 เมกะปาสกาล นอกจากนี้พบว่า อุณหภูมิการบ่มมีผลต่อกำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซิก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะทำให้กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซิก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 15 โมลาร์ให้ค่ากำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซิก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังยึดเหนี่ยวที่สูงสุด

กนกเนตร ชื่นนกลุ่ม, วริศรา โกระวิโยธิน และวิเชียร ชาติ (2557) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำ และกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน จากเถ้านหินผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงขึ้น แต่จะลดลงเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ NaOH ลดลงนอกจากนี้พบว่า การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น และอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนลดลง

จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือ การใช้ค่า NaOH มีความเข้มข้นที่ต่ำ (0.25 ถึง 1.25 โมลาร์) ต่อสมบัติของวัสดุประสานจากเถ้านหินแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 30, 40, 50 และ 60) โดยทำการศึกษาถึงสมบัติของเพสต์สด ได้แก่ ความต้องการน้ำ ระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลาย และกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน เป็นต้น และการใช้ค่า NaOH เร่งปฏิกิริยานี้ได้ไปปรับปรุงกำลังอัดระยะต้น ซึ่งเป็นข้อดีของการใช้วัสดุพอซโซลานในมอร์ตาร์และคอนกรีตให้ดีขึ้นด้วย

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงวิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ และการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ซึ่งแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2555 (ภาพที่ 3-1 (ก))
2. ใ้ถ้ำ่านหิน ใช้ใ้ถ้ำ่านหินลิกไนต์จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง (ภาพที่ 3-1 (ข))
3. สารเร่งปฏิกิริยา สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ภาพที่ 3-1 (ค))
4. ทราช ใช้ทราชแม่น้ำผ่านร่องตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (ภาพที่ 3-1 (ง))
5. หิน ใช้หินขนาดใหญ่สุด 19 มม. (ภาพที่ 3-1 (จ))
6. น้ำ ใช้น้ำสะอาด การศึกษานี้ใช้น้ำประปา

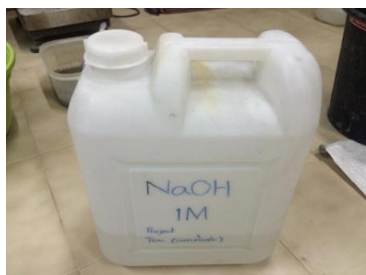


ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข. ใ้ถ้ำ่านหิน

ภาพที่ 3-1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา



ค. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ง. ทราย



จ. หิน

ภาพที่ 3-1 (ต่อ)

อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ

1. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ (ภาพที่ 3-2 (ก)) และขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³ (ภาพที่ 3-2 (ข))
2. เครื่องทดสอบกำลังอัด ยี่ห้อ ELE ขนาด 300 ตัน (ภาพที่ 3-2 (ค))
3. ชุดทดสอบการไหลมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 3-3 (ง)) และค่าการยุบตัวของคอนกรีต (ภาพที่ 3-2 (จ))
4. เครื่องผสมคอนกรีต (ภาพที่ 3-2 (ฉ))
5. ชุดทดสอบไวแควตทดสอบหาค่าชั้นเสี้ยวปกติและหาการก่อตัว (ภาพที่ 3-2 (ช))
6. อุปกรณ์ทดสอบความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหิน

7. กระบะผสมมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 3-2 (ง))



ก. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด
50 x 50 x 50 มม.³



ข. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด
100 x 100 x 100 มม.³



ค. เครื่องทดสอบกำลังอัด



ง. ชุดทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์



จ. การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต



ฉ. เครื่องผสมคอนกรีต

ภาพที่ 3-2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา



ข. ชุดทดสอบไวแคต



ช. ชุดทดสอบความความถ่วงจำเพาะ



ญ. กระบะผสมมอร์ต้าร์

ภาพที่ 3-2 (ต่อ)

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้มุ่งศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อสมบัติของวัสดุประสาน ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง โดยทำการศึกษาใน เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต โดยได้ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของ เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ค่า (0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา

1. การทดสอบในเพสต์

1.1 การทดสอบความชันเหลวปกติ โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat apparatus) เป็นวิธีการ ทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะที่ให้ค่าความชันเหลวปกติสำหรับเพสต์ โดยพิจารณา

การจมน้ำของเข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 มม. ในเวลา 30 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM C187 ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C305 โดยส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาในเพสต์ ได้ใช้เพสต์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายตามมาตรฐาน ASTM C191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือ ระยะเวลาที่เข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. จมลงไป ในเพสต์ภายในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

2. การทดสอบในมอร์ตาร์

2.1 ส่วนผสมมอร์ตาร์

การศึกษานี้ใช้มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานโดยใช้เถ้าถ่านหิน (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 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานและมวลรวมละเอียด เป็น 1 : 2.75 และใช้ปริมาณน้ำ ที่ให้ค่าการไหลของมอร์ตาร์อยู่ในช่วงมาตรฐาน (ร้อยละ 110 ± 5) แบ่งตัวอย่างทดสอบ เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่ได้ผสมสารเร่งปฏิกิริยา (กลุ่มควบคุมตารางที่ 3-1) และผสมสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นต่างกันอีก 5 ค่า (ดังตารางที่ 3-2) และหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ 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 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้ต่าง 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	การไหลของ มอร์ต้าร์ (%)
	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 มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

"F" หมายถึง เถ้าถ่านหิน

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

"30, 40, 50, 60" หมายถึง มอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินใน
อัตราส่วนร้อยละ 30, 40, 50, และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

"I" หมายถึง มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

"IF40" หมายถึง มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย
เถ้าถ่านหินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

"IF40 - 0.50M" หมายถึง มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย
เถ้าถ่านหินปริมาตรร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และผสมสาร NaOH ที่มีความ
เข้มข้น 0.50 โมลาร์

2.2 การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์

ตามสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ในตารางที่ 3-1 และ 3-2 จึงได้ปริมาณของวัสดุต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการผสมมอร์ตาร์ทั้งหมด 24 ส่วนผสม เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้หล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่มในน้ำ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ในการทดสอบกำลังอัดแต่ละอายุการบ่มได้ใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างทดสอบ โดยทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเป็น 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณของเหลว ที่ให้ค่าการไหลมาตรฐานในช่วงร้อยละ 110 ± 5 หล่อมอร์ตาร์ และทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไป บ่มในน้ำจนถึงอายุทดสอบกำลังอัด

2.3 การทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์

การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C230 เพื่อหาปริมาณน้ำที่ให้ค่าการไหลมาตรฐานในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

2.3.1 ทำความสะอาดผิวหน้าของโต๊ะการไหลให้สะอาดและแห้ง จากนั้นวางแบบทดสอบ การไหลลงตรงกลางของโต๊ะการไหล

2.3.2 ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบทดสอบการไหลให้มีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 20 ครั้งให้ทั่วตลอดหน้าตัด

2.3.3 ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบชั้นที่ 2 ซึ่งมีความสูงประมาณ 25 มม. และกระทุ้งมอร์ตาร์อีก 20 ครั้ง สำหรับการใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ให้มีความสูงกว่าแบบเล็กน้อยเพื่อทำการปาดหน้าให้ เท่ากัน อย่างสม่ำเสมอ

2.3.4 ภายหลังกะทุ้งเสร็จเรียบร้อยแล้วใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้า และปาดมอร์ตาร์ ส่วนที่เกินออกทิ้งไป

2.3.5 หากมีน้ำไหลออกมาใต้ฐานของแบบให้เช็ดน้ำออก และนำมอร์ตาร์ที่ตกข้างแบบออกให้หมด

2.3.6 ยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างช้า ๆ ซึ่งเวลาที่ใช้ตั้งแต่ใส่ มอร์ตาร์ลงแบบจนถึงเวลาที่ยก แบบออกจากผิวหน้าโต๊ะการไหลประมาณ 1 นาที

2.3.7 ภายหลังจากการยกแบบออกจากมอร์ตาร์ให้ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะ

การไหล ซึ่งจะยกงานของโต๊ะการไหลสูง 13 มม. และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบ ในเวลา 15 วินาที ในขณะที่ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหลให้ยึดโต๊ะการไหลให้แน่น อย่าให้มีการเคลื่อนตัวเพราะจะทำให้ค่าการไหลที่ทดสอบผิดพลาด

2.3.8 มอเตอร์ที่อยู่บนงานของโต๊ะการไหลจะแผ่ออกไป โดยเกือบเป็นวงกลม ให้ใช้เวอร์เนียร์หรือเทปวัด เส้นผ่าศูนย์กลางของมอเตอร์จำนวน 4 ครั้ง ตรงตำแหน่งซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา (หรือวัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนงานของโต๊ะการไหล)

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

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

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

$D_0 = 100$ มม.

ค่าที่ได้ต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5

3. การหล่อตัวอย่างมอเตอร์สำหรับทดสอบกำลังอัด

การหล่อตัวอย่างมอเตอร์ในการทดสอบกำลังอัด ใช้ตัวอย่างมอเตอร์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1 ผสมมอเตอร์ตามส่วนผสมที่กำหนดโดยทำการผสมสารละลาย NaOH กับเถ้านหิน และทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้เกิดการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหิน (ภาพที่ 3-3 (ก))

3.2 ใส่มอเตอร์ทั้งหมดลงในแบบหล่อ โดยใช้เวลาในการเทลงแบบไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที ภายหลังจากการผสมมอเตอร์เสร็จสิ้น เพื่อลดปัญหาการระเหยของน้ำออกจากส่วนผสม (ภาพที่ 3-3 (ข))

บรรจุมอเตอร์ใส่แบบหล่อชั้นแรก โดยมีความหนาประมาณ 25 มม. ซึ่งเป็นความหนา ครั้งหนึ่งของตัวอย่างมอเตอร์

กระทุ้งมอเตอร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบ ๆ ละ 8 ครั้ง แต่ละรอบการกระทุ้งจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จทุกตัวอย่างแล้วจึงใส่มอเตอร์ชั้นที่ 2 ซึ่งมีความหนาประมาณ 25 มม. จากนั้นทำการกระทุ้งมอเตอร์แต่ละตัวอย่างจำนวน 4 รอบ รอบละ 32 ครั้ง เช่นเดียวกับกรณีของชั้นแรก

(ดังนั้นแต่ละตัวอย่างจึงมีการกระทุ้ง 64 ครั้ง) ในแต่ละรอบของการกระทุ้งครั้งที่ 2 อาจมีมอร์ตาร์
 ล้นออกมานอกขอบของแบบหล่อ ดังนั้นเมื่อเสร็จการกระทุ้งแต่ละรอบ ให้ดันมอร์ตาร์ที่ล้นออกมา
 เข้าไปอยู่ในแบบ เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งแล้วมอร์ตาร์ควรมีความสูงกว่าขอบด้านบนของแบบ
 เล็กน้อย ใช้เกรียงปาดผิวหน้าของมอร์ตาร์ให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อ (ภาพที่ 3-3 (ค))
 ทำการถอดแบบมอร์ตาร์หลังหล่อแบบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำไปบ่ม ในน้ำ
 ต่อเนื่อง จนถึงอายุทดสอบ (ภาพที่ 3-3 (ง))



ก. การผสมมอร์ตาร์

ภาพที่ 3-3 การหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังอัด



ข. การหล่อมอร์ต้าร์ลงในแบบหล่อ



ค. การกระทุ้งมอร์ต้าร์ในแบบหล่อ



ง. การถอดแบบมอร์ต้าร์หลังหล่อ 24 ชั่วโมงและนำไปป้อนในน้ำต่อเนื่องจนถึงอายุทดสอบ

ภาพที่ 3-3 (ต่อ)

4. การทดสอบกำลังอัด

4.1 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ตามอายุการบ่มที่กำหนด ได้แก่ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนของอายุของมอร์ต้าร์ อายุมอร์ต้าร์ไม่เกินตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 3-3

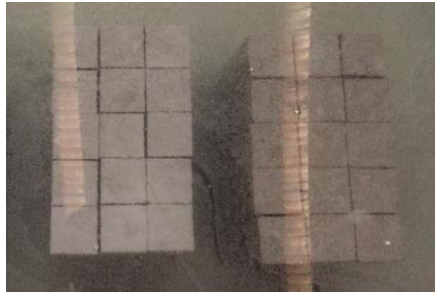
ตารางที่ 3-3 อายุของมอร์ต้าร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

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

4.2 หลังจากบ่มตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.³ ในน้ำประปาต่อเนื่อง จนถึงช่วงอายุทดสอบ นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ทำการเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้แห้ง เพื่อขจัดน้ำและเม็ดทราย หรือสิ่งทีเกาะผิวมอร์ต้าร์ออก และทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบเลือกด้านเรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน เพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ หากด้าน ที่เลือกเพื่อทำการทดสอบไม่เรียบพอจะส่งผลต่อการลดกำลังของมอร์ต้าร์อย่างมาก (ภาพที่ 3-4)

4.3 ทดสอบการรับน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยวางตัวอย่างมอร์ต้าร์บนเครื่องทดสอบให้ตรงศูนย์กลางเครื่อง (ภาพที่ 3-5)

4.4 ให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยอัตราคงที่ประมาณ 90-180 กิโลกรัมต่อวินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง (ภาพที่ 3-6)



ภาพที่ 3-4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์



ภาพที่ 3-5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์



ภาพที่ 3-6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างมอร์ต้าร์

5. การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

5.1 ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ใช้เถ้าถ่านหิน ชนิด F แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก และใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นต่างกัน 3 ค่า 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ โดยจะทำการแบ่งตัวอย่างทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่ได้ผสมสารเร่งปฏิกิริยา (กลุ่มควบคุมตารางที่ 3-4) และผสมสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นของ NaOH ต่างกันอีก 3 ค่า 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ (ดังตารางที่ 3-5)

ตารางที่ 3-4 ส่วนผสมคอนกรีตควบคุม

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก				น้ำ	W/B
	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย	หิน		
IF40	252	168	819	920	190	0.45
IF50	210	210	800	920	190	0.45
IF60	168	252	785	920	190	0.45

ตารางที่ 3-5 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ด่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก				สารละลาย NaOH	W/B
	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย	หิน		
IF40 - 0.25 M	252	168	819	920	190	0.45
IF40 - 0.50 M	252	168	819	920	190	0.45
IF40 - 0.75 M	252	168	819	920	190	0.45

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก			NaOH	W/B	
	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย			
IF50 - 0.25 M	210	210	800	920	190	0.45
IF50 - 0.50 M	210	210	800	920	190	0.45
IF50 - 0.75 M	210	210	800	920	190	0.45
IF60 - 0.25 M	168	252	785	920	190	0.45
IF60 - 0.50 M	168	252	785	920	190	0.45
IF60 - 0.75 M	168	252	785	920	190	0.45

หมายเหตุ: "I" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

"F" หมายถึง เถ้าถ่านหิน

"40, 50, 60" หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ

40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

"I" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

"IF 30" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินขนาดร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

"IF 30 - 0.75M" หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินขนาดร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และผสมสารละลาย NaOH ที่มี ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์

5.2 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 100 x 100 x 100 มม.³ ให้ใช้เหล็ก กระทุ้งโดยเหล็กกระทุ้ง โดยบรรจุคอนกรีต 2 ชั้น ชั้นละเท่า ๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง

5.3 การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต

5.3.1 แบบวัดค่าการยุบตัวต้องเป็ยก และนำมาวางบนพื้นผิวที่เรียบและชื้น (พื้นต้องแข็งและไม่ดูดซึมน้ำ) ผู้ทำการวัดต้องยึดแบบให้มั่นคงและแน่นโดยการเหยียบบนที่เหยียบของมาตรฐานแบบทั้งสองด้าน เติมคอนกรีตสดลงในแบบจำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นประมาณหนึ่งในสามของความสูงของแบบ

5.3.2 ทำการกระทุ้งคอนกรีตในแต่ละชั้นด้วยแท่งกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง โดยกระทุ้งให้กระจายให้ทั่วตลอดผิวหน้าของแต่ละชั้น

5.3.3 ในการเติมคอนกรีตและกระทุ้งชั้นบนสุด ให้เติมคอนกรีตให้พูนเลยขึ้นมาจากขอบแล้วทำการกระทุ้ง ถ้าคอนกรีตยุบต่ำกว่าขอบด้านบนเนื่องจากการกระทุ้งให้ทำการเติมคอนกรีตเข้าไปและรักษาให้มีปริมาณคอนกรีตพูนเกินกว่าขอบตลอดเวลา

5.3.4 หลังจากเสร็จสิ้นการกระทุ้งในชั้นบนสุดแล้ว ให้ทำการปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เสมอด้วยการใช้แท่งกระทุ้งปาดและกลิ้งไปมา

5.3.5 ค่อย ๆ ดึงแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างระมัดระวัง โดยดึงแบบยาว 12 นิ้ว (300 มม.) ออกภายในเวลา 5 ± 2 วินาที ทั้งนี้ต้องดึงแบบออกในแนวตั้งโดยปราศจากการเคลื่อนที่ด้านข้างหรือการบิดใด ๆ

5.3.6 ทำการวัดค่าการยุบตัว (Slump) ด้วยการหาความแตกต่างของระยะระหว่างขอบด้านบนของแบบกับจุดกึ่งกลางของผิวหน้าของคอนกรีต ทั้งนี้ต้องทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวให้เสร็จภายในเวลา 2 1/2 นาทีหลังจากเริ่มเติมคอนกรีตลงในแบบวัดค่าการยุบตัว

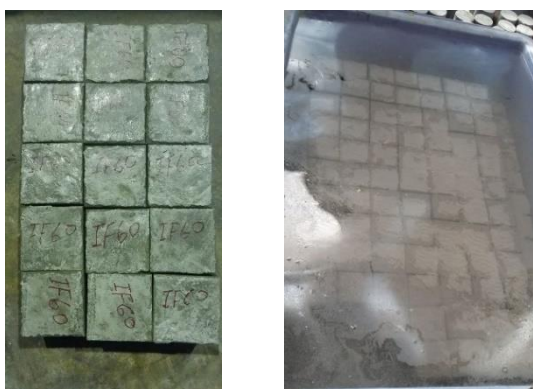
5.3.7 ถ้ามีการกระจายออกหรือการเนื่องขาดด้านข้างของคอนกรีตตัวอย่างเกิดขึ้น ให้ยกเลิกการวัดนั้นเสีย แล้วทำการทดสอบใหม่จากส่วนผสมส่วนอื่นของคอนกรีตนั้น ถ้ายังเกิดเหตุการณ์แบบเดิมขึ้นอีก แสดงว่าคอนกรีตที่ผสมขาดการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตในภาวะพลาสติกที่ดี จึงไม่สามารถทดสอบวัดค่าการยุบตัวได้

5.3.8 หลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบหาค่าการยุบตัวสามารถนำไปในการหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ต่อไปได้

เมื่อทำการหล่อคอนกรีตลงแบบหล่อครบ 24 ชั่วโมงก็ทำการแกะตัวอย่างคอนกรีตออกจากแบบหล่อแบบทำการบ่มคอนกรีตให้ได้อายุวันตามต้องการตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัวแสดงดังภาพที่ 3-7

5.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม.³ ที่ได้เตรียมนำไปทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน BS 1881 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยตัวอย่างต้องอยู่ในสภาพแห้งและนำตัวอย่างไปเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดขนาด 300 ตัน แสดงดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัวนำไปทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ 3-8 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

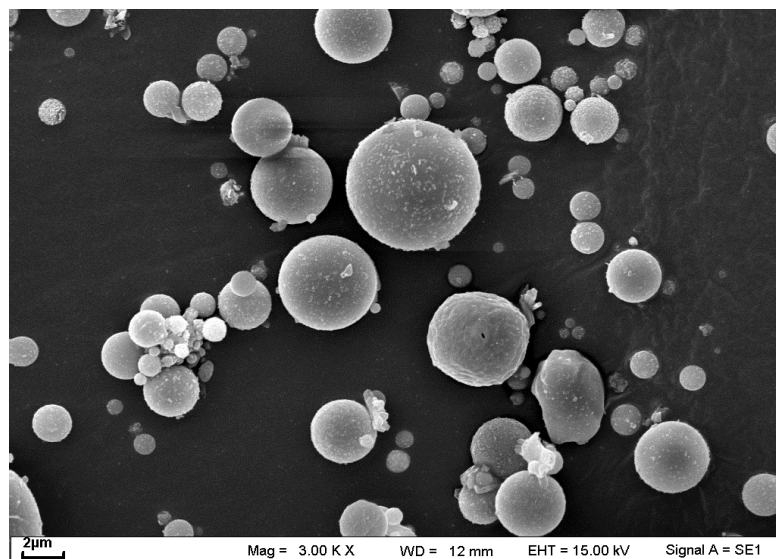
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเพสต์สด มอร์ต้าร์สด และคอนกรีต เช่น ความต้องการน้ำ การก่อตัวของเพสต์ การยุบตัวของคอนกรีต และทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์กับคอนกรีตที่แข็งตัว

สมบัติของวัสดุ

1. วัสดุประสาน

1.1 สมบัติทางกายภาพ

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเถ้าถ่านหิน ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และความละเอียดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 และภาพขยายของเถ้าถ่านหินได้แสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ภาพขยายของเถ้าถ่านหินแม่เมาะชนิด F โดยใช้เครื่อง SEM ปี 2558

1.2 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	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
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	1.50
LOI.	2.03	0.15

2. สมบัติของมวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.65 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.70 และ โมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.67 ส่วนมวลรวมหยาบใช้เป็น หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. (หินเบอร์ 3/4 นิ้ว) มีความถ่วงจำเพาะรวม เท่ากับ 2.72 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.67 และ โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.69

3. ค่าแรงปฏิบัติการ

ค่าแรงปฏิบัติการใช้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ค่า pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-เบส ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของค่าที่คำนวณจาก $\text{pH} = 14 - (-\log(\text{OH}^-))$ และมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.1 กรัม/ซม.³

สมบัติของเพสต์

1. ความต้องการน้ำของเพสต์ที่ให้ความชื้นเหลือปกติ

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติของเพสต์มีความสำคัญต่อการเตรียมตัวอย่างเพสต์เพื่อทดสอบสมบัติอื่น ๆ เช่น ระยะเวลาก่อตัวต้น ระยะเวลาก่อตัวปลาย ที่ต้องเตรียมตัวอย่างทดสอบให้เพสต์มีความชื้นเหลือปกติ การทดสอบความชื้นเหลือปกติได้ใช้มาตรฐาน ASTM C 187 และชุดทดสอบไวแคต (Vicat apparatus) ที่มีเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.หนัก 300 กรัม ตกลงอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาที และเข็มนจมไปในเพสต์เป็นความลึกเท่ากับ 10 มม. ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติของเพสต์แสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ความชื้นเหลือปกติ เวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้าย

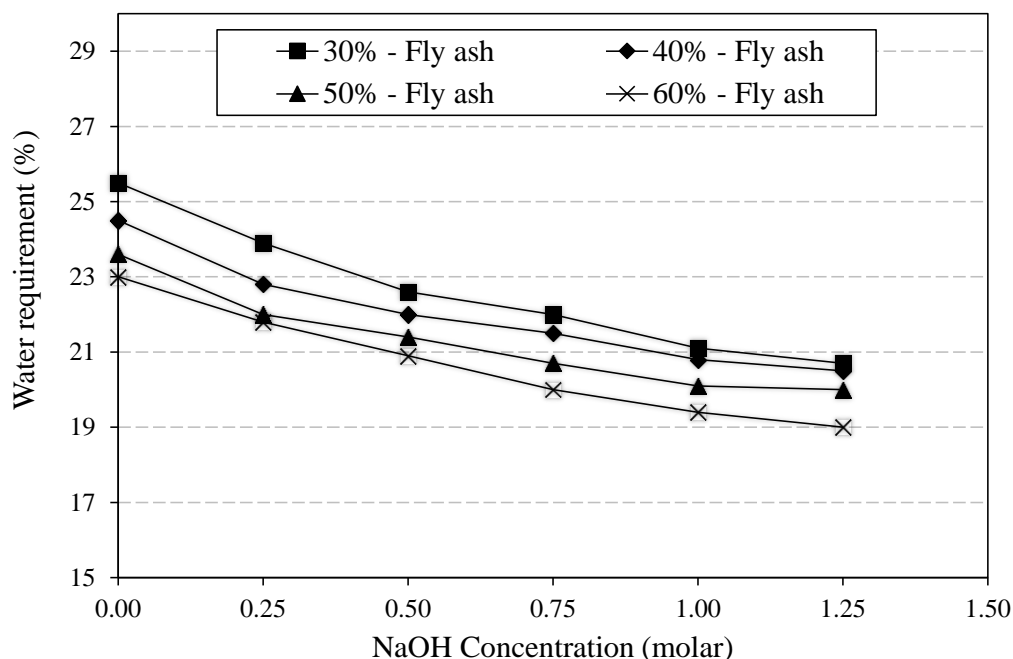
ส่วนผสม	ความชื้นเหลือปกติ (ร้อยละ)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
IF30	25.50	110	200
IF30 - 0.25M	23.90	55	125
IF30 - 0.50M	22.60	65	140
IF30 - 0.75M	22.00	70	155
IF30 - 1.00M	21.10	75	170
IF30 - 1.25M	20.70	90	180
IF40	24.50	125	235
IF40 - 0.25M	22.80	70	130
IF40 - 0.50M	22.00	85	145
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	ความชื้นเหลือปกติ (ร้อยละ)	การก่อดั้วเริ่มต้น (นาทีก)	การก่อดั้วสุดท้าย (นาทีก)
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

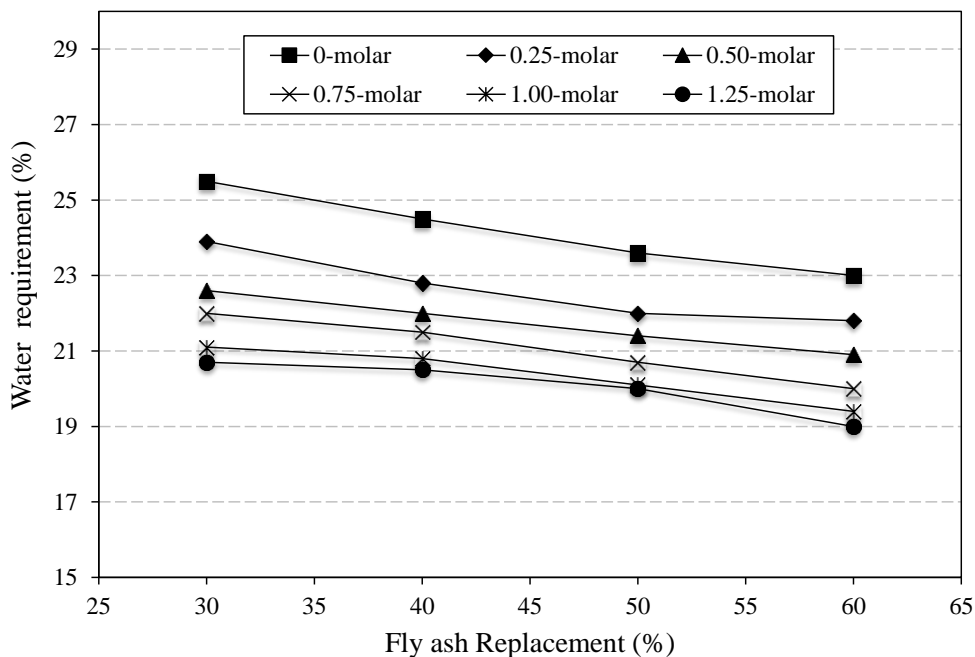
1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อปริมาณน้ำของเพสต์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายที่ใช้ในการผสมเพสต์ที่ความเข้มข้นต่างกัน เพื่อให้ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติ พิจารณาตามภาพที่ 4-2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายของ NaOH เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของเพสต์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในทุกส่วนผสม เนื่องจากว่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ค่อนข้างต่ำ ทำให้เพสต์สั้นไหล (Sodium Hydroxide-NaOH, 2011) จึงทำให้ความต้องการน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติมีแนวโน้มลดลง เช่น ปริมาณแก้ว่านหินเท่ากับร้อยละ 30 และใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 โมลาร์ ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้เพสต์มีความชื้นเหลือปกติมีค่าเท่ากับร้อยละ 25.50, 23.90, 22.60, 22.00, 21.10 และ 20.70 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อความต้องการน้ำของเพสต์

1.2 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อความต้องการน้ำของเพสต์ที่ให้ความชื้นเหลวปกติ เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อความต้องการน้ำที่ให้ความชื้นเหลวปกติของเพสต์ ดังภาพที่ 4-3 พบว่า เมื่อปริมาณของเถ้าถ่านหินที่ผสมในเพสต์เพิ่มมากขึ้น ให้ความต้องการน้ำของเพสต์ลดลง เป็นเพราะเถ้าถ่านหินที่กลมและผิวเรียบทำให้เพสต์ผสมเข้ากันได้และมีการไหลลื่นได้ดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องการให้ให้ความชื้นเหลวปกติมีแนวโน้มลดลง (สิรทรัพย์ รัตชนภาส, 2545; ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547) จากภาพที่ 4-3 เป็นที่น่าสังเกตว่ากลุ่มที่ผสมสารละลาย NaOH เพื่อเร่งปฏิกิริยามีผลให้การใช้เถ้าถ่านหินปริมาณมากขึ้นมีความต้องการน้ำลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมสาร NaOH ทั้งนี้เนื่องจากสารละลาย NaOH มีสมบัติที่ทำให้เกิดการลื่นไหลคืออยู่แล้ว ดังที่กล่าวมาข้างต้น ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหิน การลื่นไหลที่เกิดขึ้นก็ไม่มากเท่ากับกลุ่มควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duo, Yonghao, Chenhui, Yongfan, and Yamin (2016) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณของเถ้าถ่านหินสูงขึ้น จะทำให้ความต้องการน้ำที่ให้เพสต์อยู่ในความชื้นเหลวปกติมีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณของเถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 10 และ 40 จะได้ความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 24.8 ไปเป็นร้อยละ 24.0 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-3 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อความต้องการน้ำของเพสต์

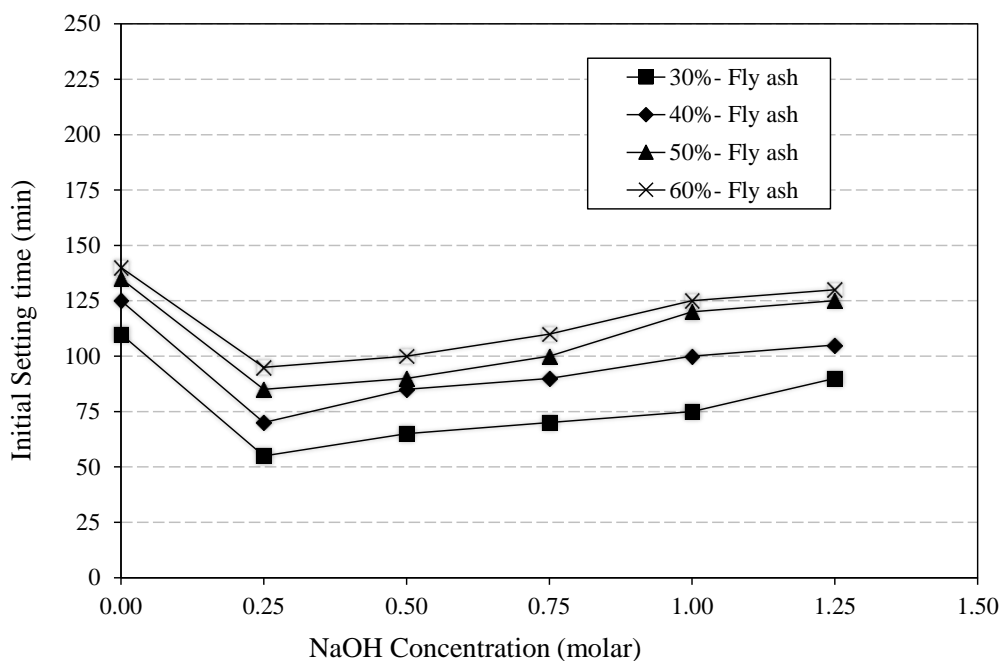
1. การก่อตัวของเพสต์

1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการก่อตัวของเพสต์

รูปแบบของผลการทดสอบของการก่อตัวของเพสต์ทุก ๆ ส่วนผสม แสดงดังในภาพที่ 4-4 (ก) และ 4-4 (ข) ที่แสดงถึงผลของค่าแรงปฏิกิริยาต่อระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและปลาย ส่วนรายละเอียดของผลของการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบเห็นว่า เวลาที่เร็วที่สุดของการก่อตัวของเพสต์เทียบกับทุกส่วนผสมมีค่าประมาณ 55 นาที เป็นเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของส่วนผสมที่ใช้เถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 30 และมีการใช้ค่า NaOH ความเข้มข้นเท่ากับ 0.25 โมลาร์ และการก่อตัวของเพสต์ของส่วนผสมที่ใช้ค่า NaOH ที่ใช้เวลานานที่สุดถึง 130 นาที ที่เป็นเวลาการก่อตัวระยะต้นของส่วนผสมที่ได้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1.25 โมลาร์ และใช้เถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 60

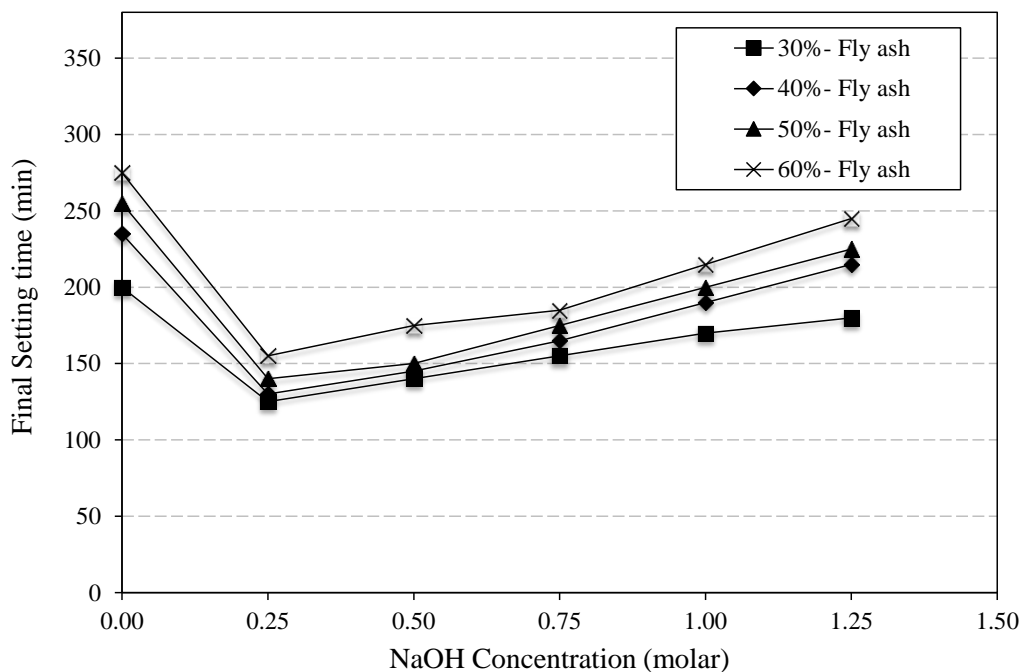
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายในกลุ่มที่ใช้ค่า NaOH กระตุ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-4 (ก) และ 4-4 (ข) ตามลำดับ พบว่า การใช้ NaOH มีความเข้มข้นสูงขึ้นมีแนวโน้มให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น แต่อย่างน้อยกว่ากลุ่มควบคุม ระยะเวลาการก่อตัวของกลุ่มที่ใช้ค่า NaOH แรงปฏิกิริยาเร็วกว่ากลุ่มควบคุม อาจเกิดจากสารประกอบของซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อผสมสารละลายของด่าง NaOH ที่มีผลต่อการก่อตัวของเพสต์ เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิวและสารละลายจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกา และอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้มากขึ้น จึงเป็นผลให้มีการก่อตัวเร็วขึ้น โดยในช่วงของการก่อตัวเร็วที่สุดอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.75 โมลาร์ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pradip and Prabir (2015) และงานวิจัยของ Sakonwan et al. (2014) ที่ระบุว่าระยะเวลาการก่อตัวต้น และก่อตัวปลายจะนานขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ NaOH เพิ่มขึ้น และสามารถสังเกตจากภาพที่ 4-4 (ก) และ 4-4 (ข) ตามลำดับ สำหรับส่วนผสมที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 50 และการใช้สารละลายด่าง 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

ภาพที่ 4-4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการก่อตัวของเพสต์

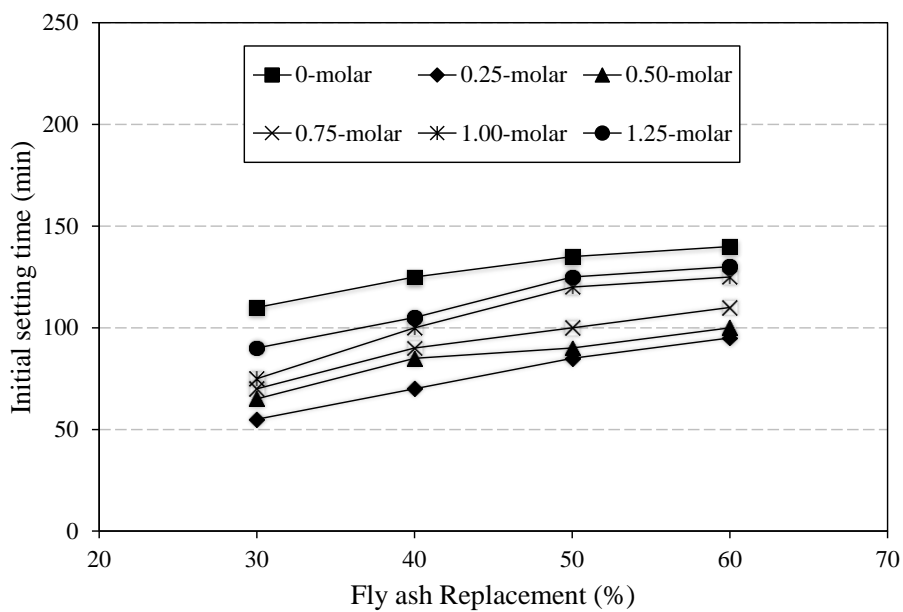


ข. การก่อตัวสุดท้ายของเพสต์

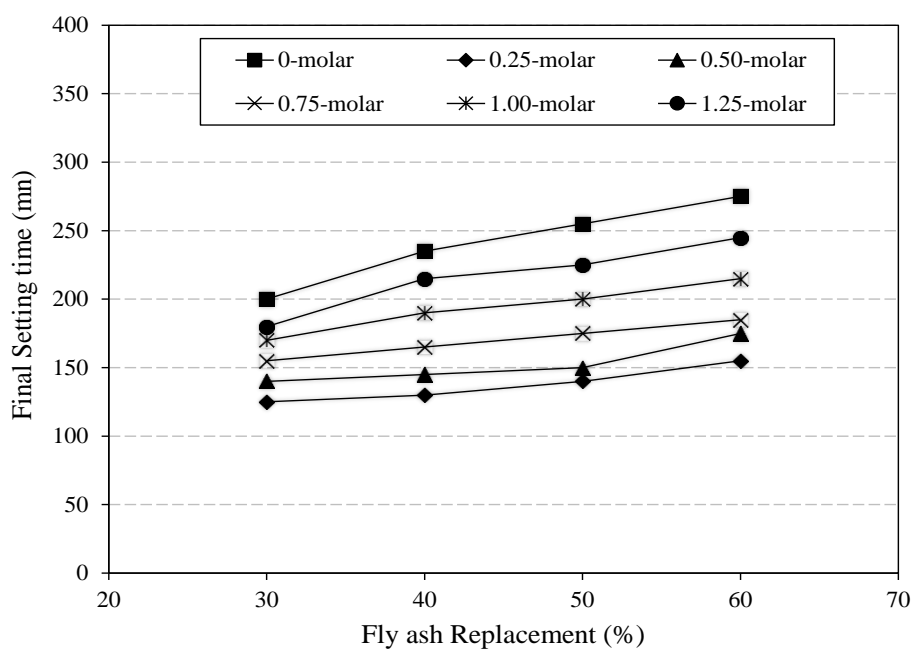
ภาพที่ 4-4 (ต่อ)

1.2 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการก่อตัวของเพสต์

ผลการทดสอบหาการก่อตัวของเพสต์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-2 และพิจารณาผลของปริมาณเถ้าถ่านหินดังภาพที่ 4-5 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นในส่วนผสมส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของเพสต์ มีแนวโน้มมากขึ้น โดยให้ผลในทิศทางเดียวกันในทุกส่วนผสม ทั้งนี้เป็นผลจากการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ระยะเวลาการก่อตัวต้นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลงจึงมีผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย การก่อตัวในระยะต้นจึงใช้เวลานานขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ธีรทรัพย์ รัตชนภาส, 2545; ปริญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร, 2528; Jaturapitakkul, Kiattkomol, Siripanichkorn, & Kunchorn, 1999; Owens, 1979) เช่น ที่ปริมาณของด่าง NaOH เท่ากับ 0.25 โมลาร์ และใช้เถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 55, 70, 85 และ 95 นาที และระยะปลายเท่ากับ 125, 130, 140 และ 155 นาที ตามลำดับ



ก. การก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์



ข. การก่อตัวระยะปลายของเพสต์

ภาพที่ 4-5 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อการก่อตัวของเพสต์

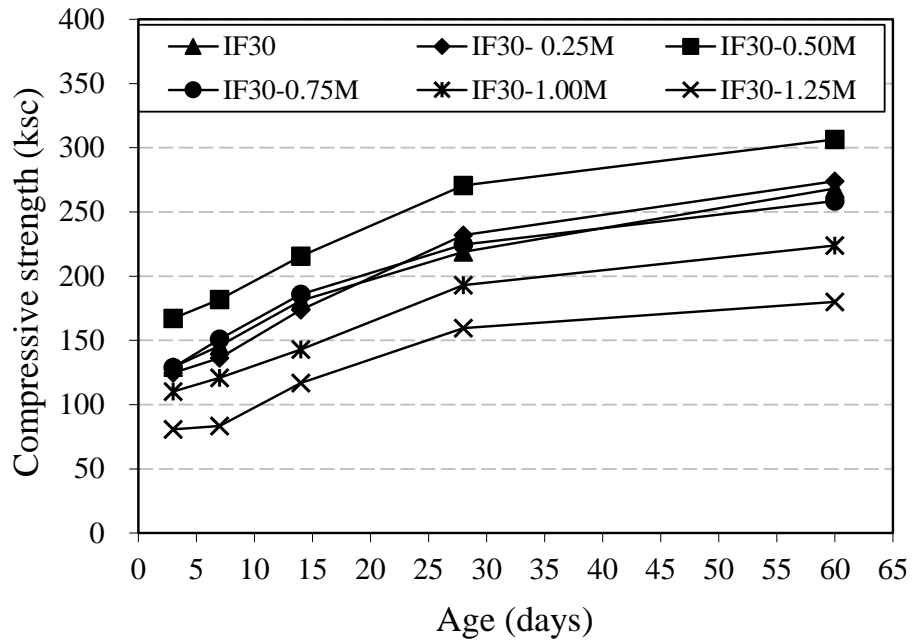
สมบัติของมอร์ต้าร์

1. การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์

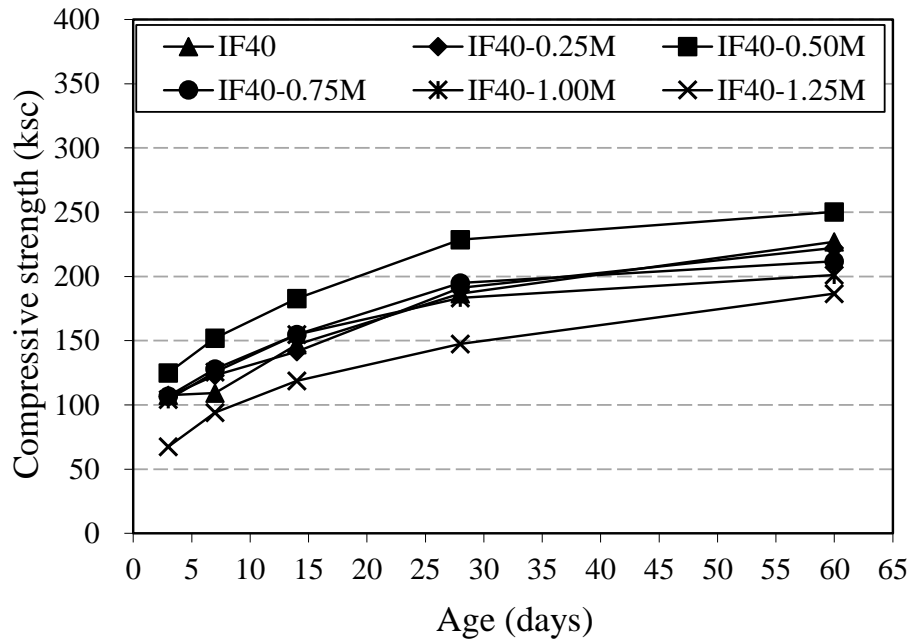
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์แสดงในตาราง 4-3 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดคงภาพที่ 4-6 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินและค้างเร่งปฏิกิริยาสามารถให้มอร์ต้าร์มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้นในทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลต่อการรับแรงเชิงกล โดยสังเกตได้จากค่าการพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วันแรกมีแนวโน้มสูงกว่าช่วง 28 วันถึง 60 วัน ทั้งนี้เนื่องจาก ในช่วงอายุต้นของการบ่ม กำลังอัดของมอร์ต้าร์จะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำเป็นหลัก จึงมีผลทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้นเป็นไปตามหลักคอนกรีตเทคโนโลยีโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ พบว่า ไม่เห็นความแตกต่าง (สังเกตจากความชันของกราฟใกล้เคียงกัน) ทั้งนี้อาจเกิดจากการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ซึ่งการใช้ NaOH เร่งปฏิกิริยาจะมีผลกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ เทียบกับอายุ 3 วัน พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนหลังอายุ 7 วันเป็นต้นไป เช่น มอร์ต้าร์ควบคุมที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 3 วันเท่ากับ 170, 173, 198 และ 201 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจาก กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วง 7 วัน เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งส่งผลให้มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น ประกอบกับที่อายุ 3 วัน กำลังอัดของมอร์ต้าร์ในกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงขึ้น มีค่าต่ำจึงทำให้ร้อยละของอายุปลายต่ออายุต้นมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4-3 ค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์เทียบกับอายุ 3 วัน ของทุกส่วนผสม

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²) - 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

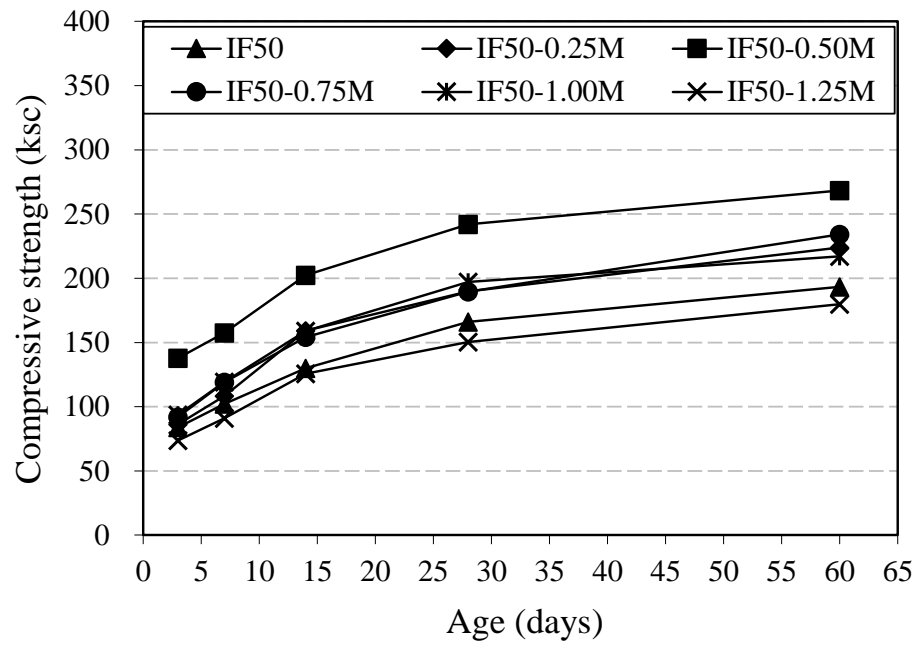


ก. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30

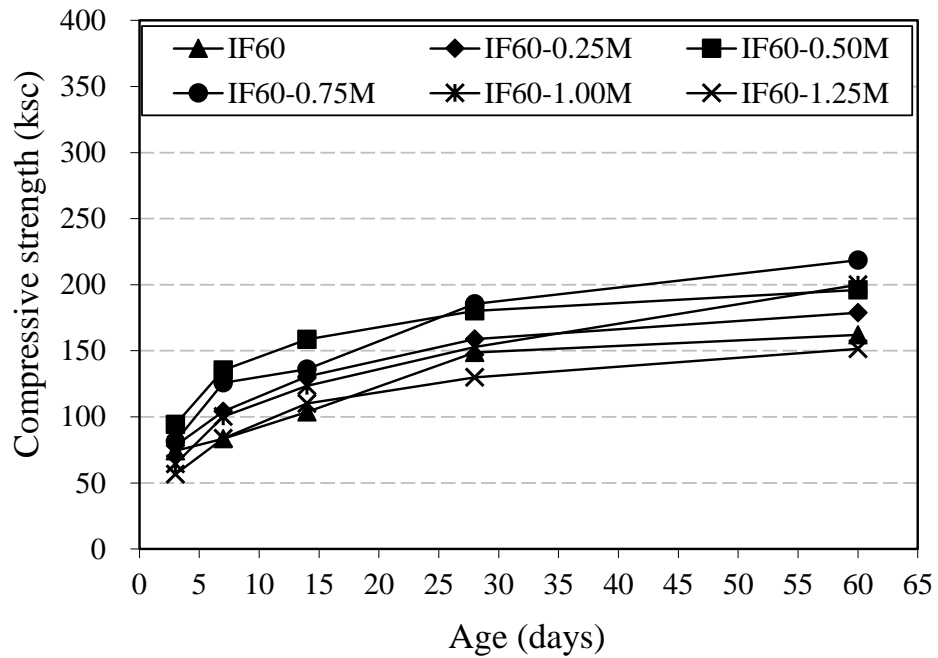


ข. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40

ภาพที่ 4-6 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุบ่มของมอร์ต้าร์



ค. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50



ง. มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60

2. ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

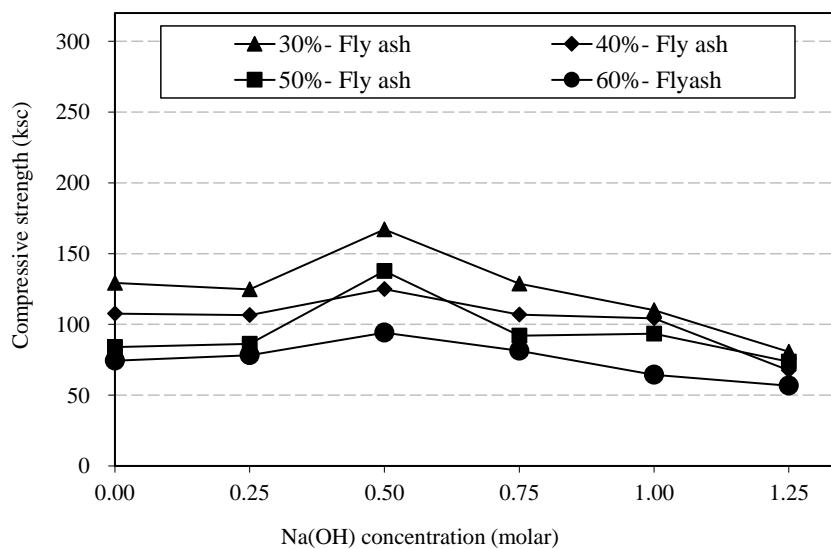
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH ในการเร่งปฏิกิริยา ดังตารางที่ 4-4 และพิจารณาที่อายุการบ่มช่วงต้น (3 วัน) ดังภาพที่ 4-7 (ก) พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่ของเถ้าถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH โดยแนวโน้มดังกล่าวเห็นชัดเจนมากขึ้น เมื่ออายุของมอร์ต้าร์ถึง 28 วัน ดังภาพที่ 4-7 (ง) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกจากเถ้าถ่านหิน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Jonh and Ban, 2003; Bahadure & Naik, 2013) เช่น กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 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./ cm^2 ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอายุการทดสอบ เช่น กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 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./ cm^2 ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดมอร์ต้าร์ เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปมากกว่า 0.50 โมลาร์ อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจอความชื้นจะทำให้มีความลื่นมากขึ้น และส่งผลให้แรงยึดเกาะ ภายในซีเมนต์เพสต์ต่ำลง ส่งผลให้กำลังของมอร์ต้าร์ลดลง (Sodium Hydroxide-NaOH, 2011) ได้ อีกอย่างเมื่อใช้ปริมาณของค่าที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณของพูนในมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์อย่างแน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Risdanareni, Januarti, and Triwulan (2014) ที่แสดงถึงการทดสอบความพูนของตัวอย่างที่ใช้ค่าที่สูงถึง 10 M จะมีปริมาณพูนที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ค่าเท่ากับ 8M อย่างไรก็ตาม ที่อายุมอร์ต้าร์นานขึ้นเป็น 28 วัน พบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปเริ่มมีผลต่อการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ส่งผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดมากขึ้น การใช้ค่าเร่งปฏิกิริยาในมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงในครั้งนี พบว่า

ในทุกกลุ่มการแทนที่เถ้านหินและใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.75 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่ากลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ใช้เถ้านหินในปริมาณสูง (ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นถึง 1.00 โมลาร์ มีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม เช่น มอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 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 ให้ผลที่ดีขึ้นในมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้านหินในปริมาณสูง และเริ่มเห็นผลชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุบ่มนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นในช่วงหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon, Qiao, and Lin (2003) ส่วนการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.25 โมลาร์ พบว่า ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมในทุกส่วนผสม และทุกอายุการบ่ม จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นต่างเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

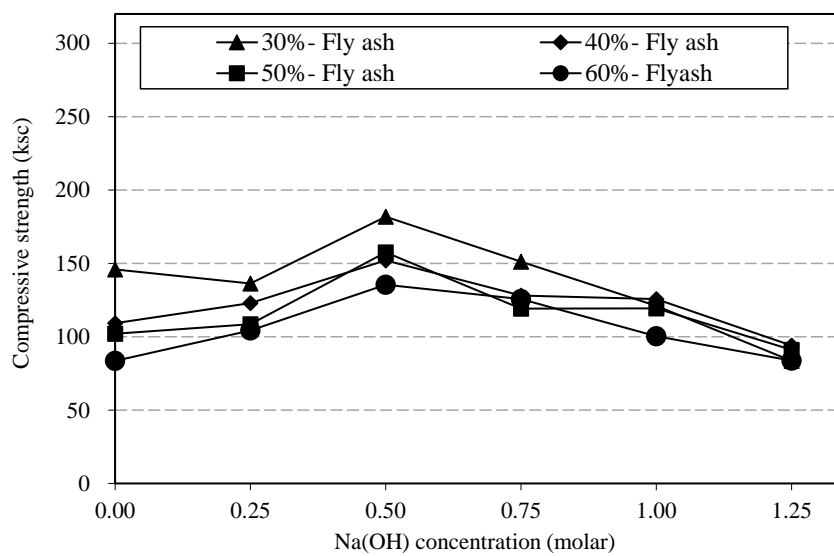
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ในรูปของร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม (Normalized compressive strength) ของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4-8 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการแทนที่ด้วยเถ้านหิน มีค่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 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 การใช้ต่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาให้เข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น ส่วนการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.25 โมลาร์ ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมต่ำกว่า 100 ในทุกส่วนผสม

ตารางที่ 4-4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)					กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม (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
IF50-0.75M	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

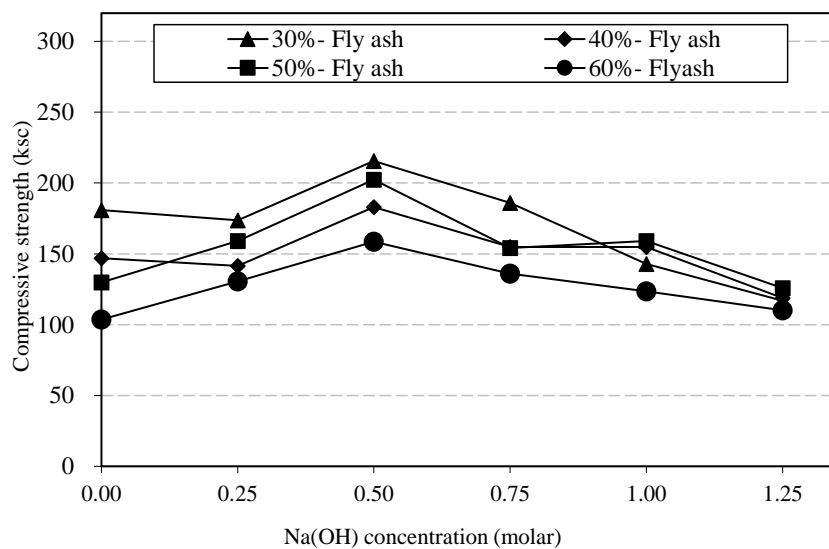


ก. อายุบ่ม 3 วัน

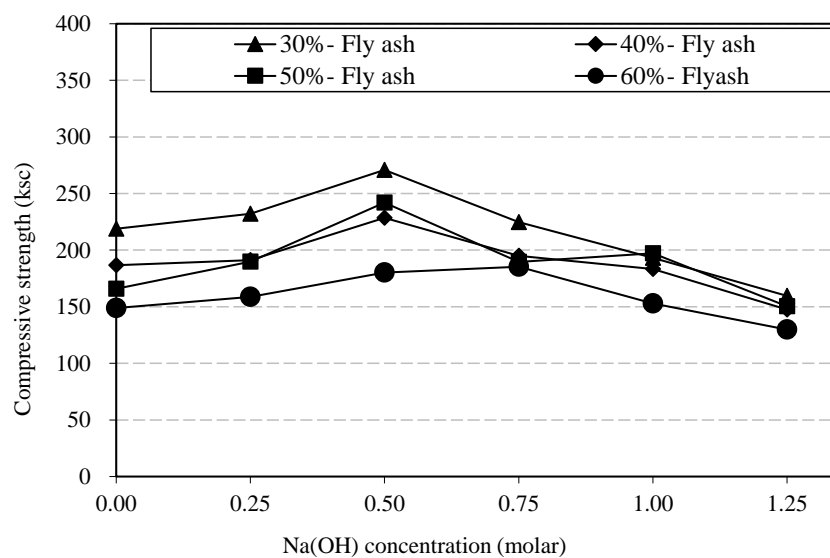


ข. อายุบ่ม 7 วัน

ภาพที่ 4-7 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

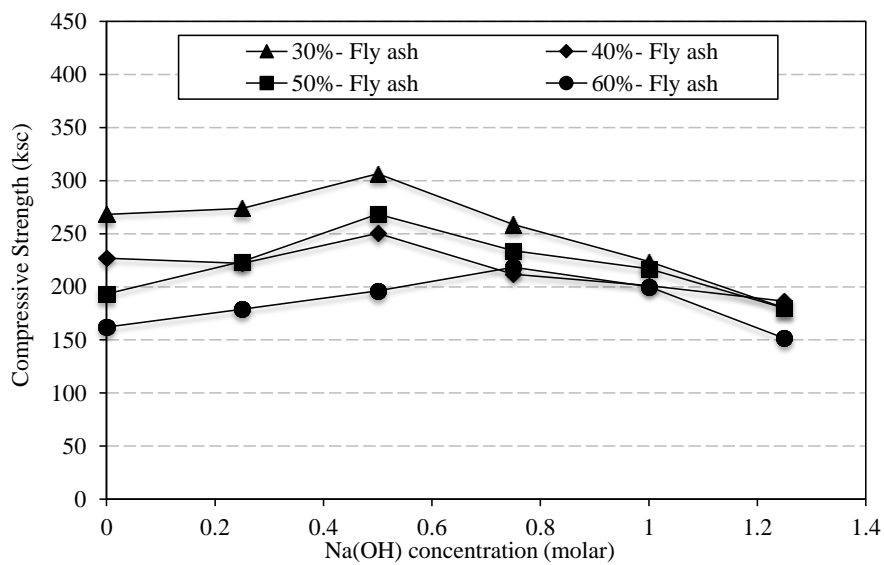


ก. อายุบ่ม 14 วัน



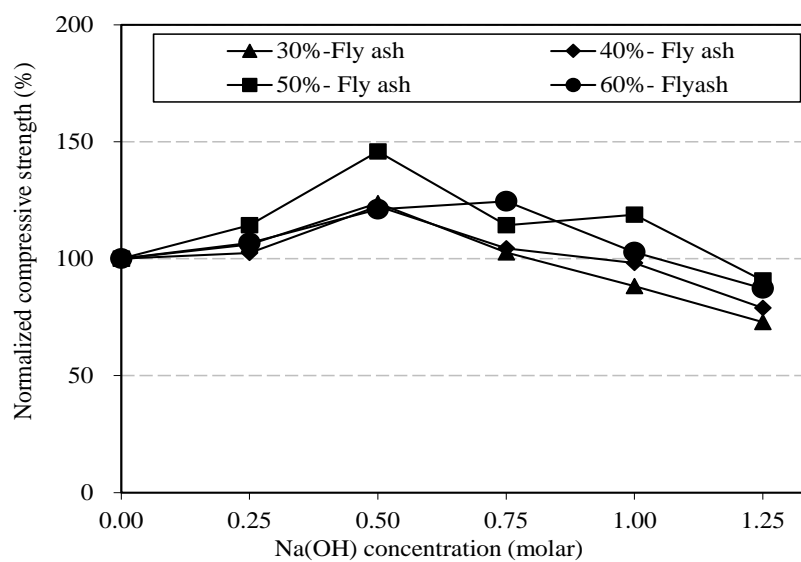
ง. อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4-7 (ต่อ)



จ. อายุบ่ม 60 วัน

ภาพที่ 4-7 (ต่อ)

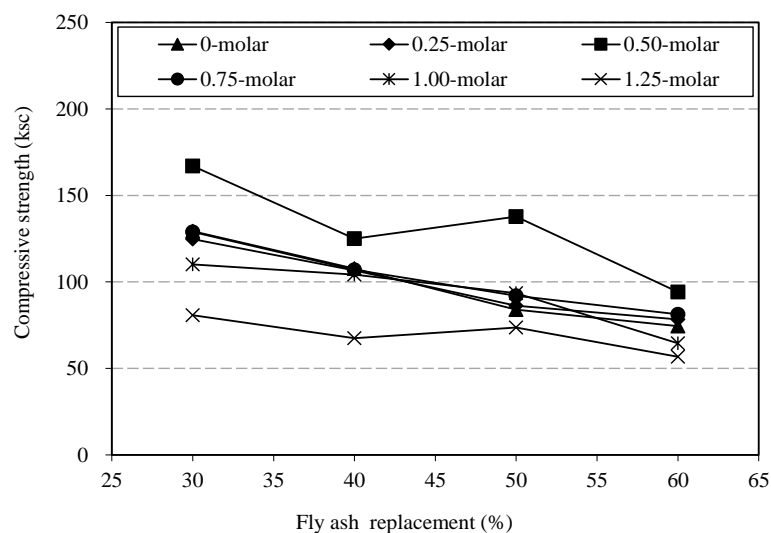


ภาพที่ 4-8 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุม

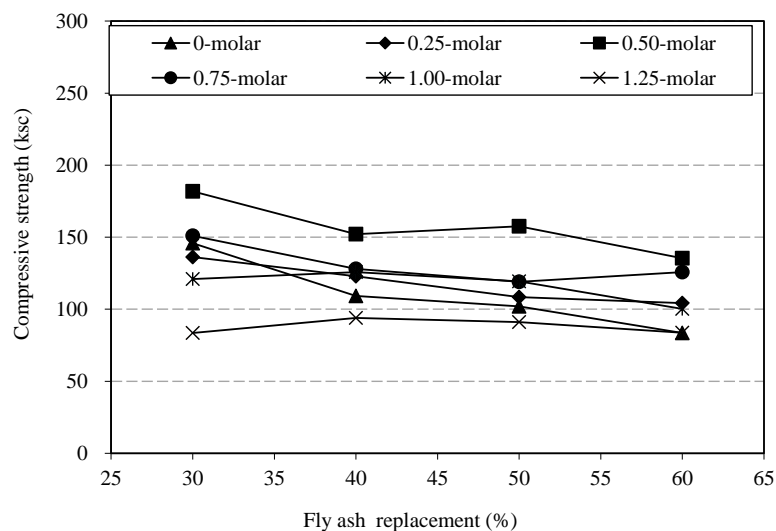
3. ผลของปริมาณเถ้านหินต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ดังภาพที่ 4-9 (ก), 4-9 (ข), 4-9 (ค), 4-9 (ง), 4-9 (จ) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้านหินในปริมาณที่มากขึ้น มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ โดยเห็นผลชัดเจนในมอร์ต้าร์ที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยา เช่น มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 ที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 219, 187, 166 และ 149 กก./ชม.² ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณเถ้านหินที่สูงขึ้น ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย ประกอบกับอายุของมอร์ต้าร์ที่ 28 วัน อาจมีผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ยังไม่สมบูรณ์ และการแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง จึงมีทำให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ น้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การใช้เถ้านหินผสมในมอร์ต้าร์ในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ด่างเร่ง เช่น การใช้เถ้านหินเพิ่มจากร้อยละ 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 มีผลทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และให้กำลังอัดดีขึ้น ซึ่งสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 และอลูมินาจากเถ้านหินเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่ให้กำลังกับมอร์ต้าร์ได้ดีขึ้น (ปริญญาจินดาประเสริฐ, 2547) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเหมาะสม สามารถใช้เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramin, Jonhson, and Mohd (2014) ผลการศึกษาพบว่า การใช้อัตราส่วนของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้านหิน (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

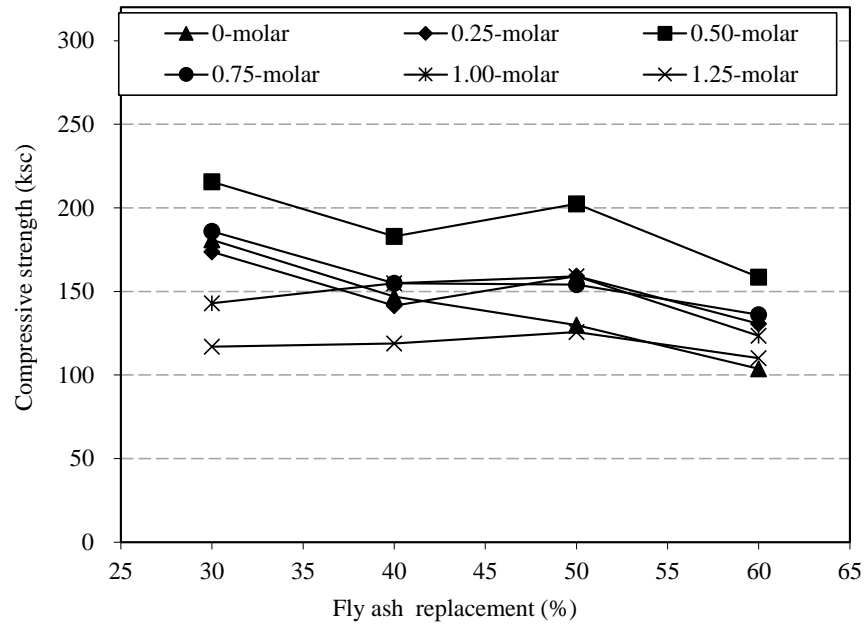


ก. อายุบ่ม 3 วัน

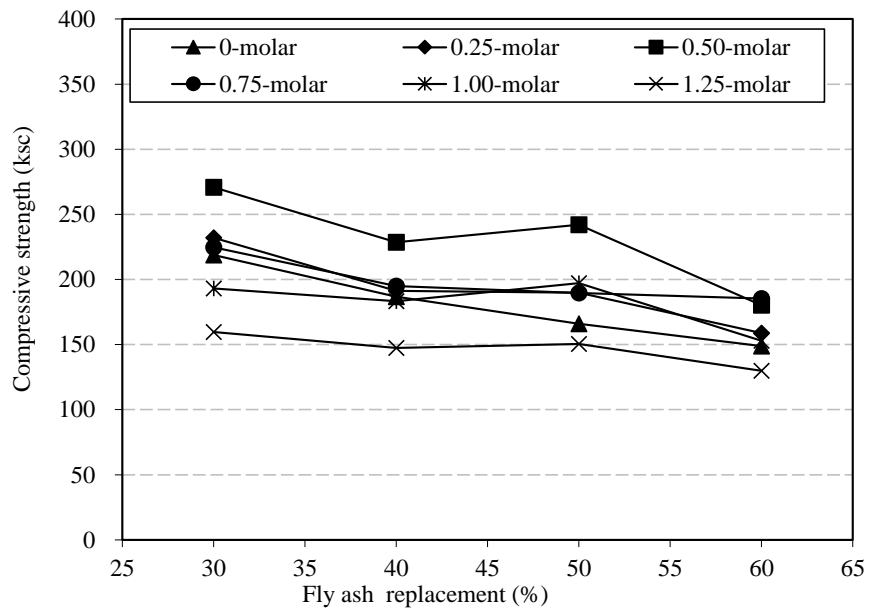


ข. อายุบ่ม 7 วัน

ภาพที่ 4-9 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

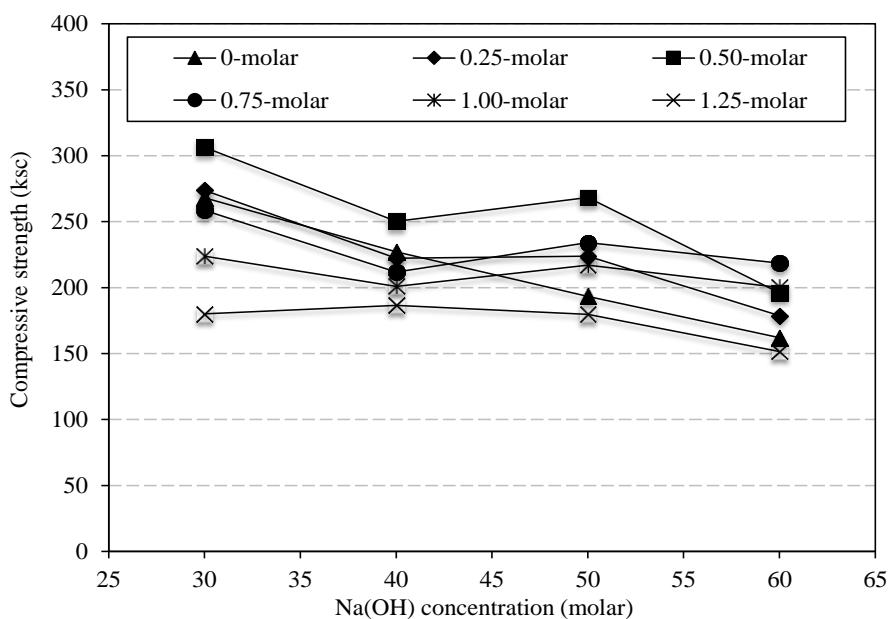


ก. อายุบ่ม 14 วัน



ง. อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4-9 (ต่อ)



จ. อายุบ่ม 60 วัน

ภาพที่ 4-9 (ต่อ)

สมบัติของคอนกรีต

สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตที่ได้ใช้กับทดสอบครั้งนี้ ได้มาจากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

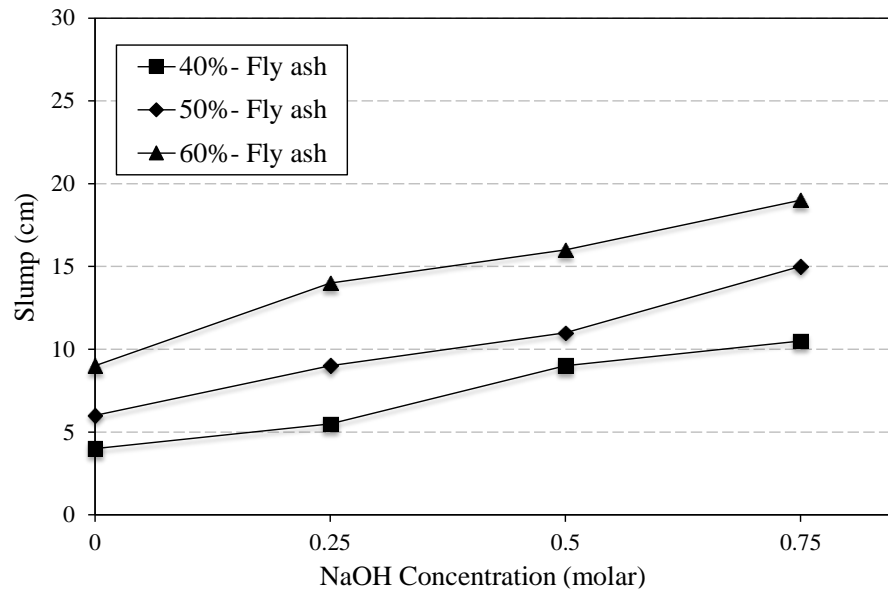
1. การยุบตัวของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4-5 โดยผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และปริมาณแทนที่เถ้าถ่านหินต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 4-10 (ก) และ 4-10 (ข) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ ภาพที่ 4-10 (ก) พบว่า เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับผลการทดสอบในเพสต์หรือมอร์ตาร์ ซึ่งจะเป็นผลจากค่า NaOH ที่สิ้นสามารถลดความเสียดทานระหว่างมวลรวมได้ ตลอดจนความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับการใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจะลดผลของความหนืดที่มีผลทำให้คอนกรีตเหนียวและมีผลต่อการลดค่ายุบตัวลงได้ รวมกับการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำ ไม่มีผลต่อการดึงโมเลกุลของวัสดุประสานในคอนกรีตที่ทำให้ลดค่ายุบตัวของคอนกรีตลง (Rezaul et al., 2014) การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูงขึ้นช่วยเพิ่มค่าการยุบตัวของ

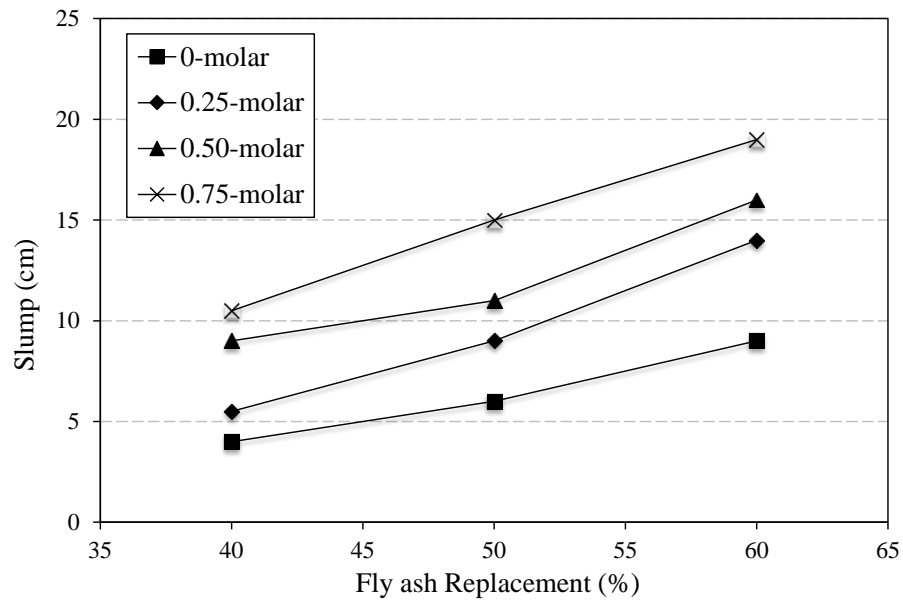
คอนกรีตให้สูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4-10 (ข) ซึ่งเป็นผลจากอนุภาพที่กลมตัน และผิวเรียบของแก้ว ถ่านหินทำให้คอนกรีตมีการสิ้นเปลือง (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) ซึ่งสอดคล้องผลการ ทดสอบในเพสต์และมอร์ตาร์ดังที่กล่าวมา เป็นต้น

ตารางที่ 4-5 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ส่วนผสม	ค่าการยุบตัว (ซม.)
IF40	4.00
IF40 - 0.25M	5.50
IF40 - 0.50M	9.00
IF40 - 0.75M	10.50
IF50	6.00
IF50 - 0.25M	9.00
IF50 - 0.50M	11.00
IF50 - 0.75M	15.00
IF60	9.00
IF60 - 0.25M	14.00
IF60 - 0.50M	16.00
IF60 - 0.75M	19.00



ก. ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต



ข. ผลของเถ้าถ่านหิน ต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ภาพที่ 4-10 การยุบตัวของคอนกรีต

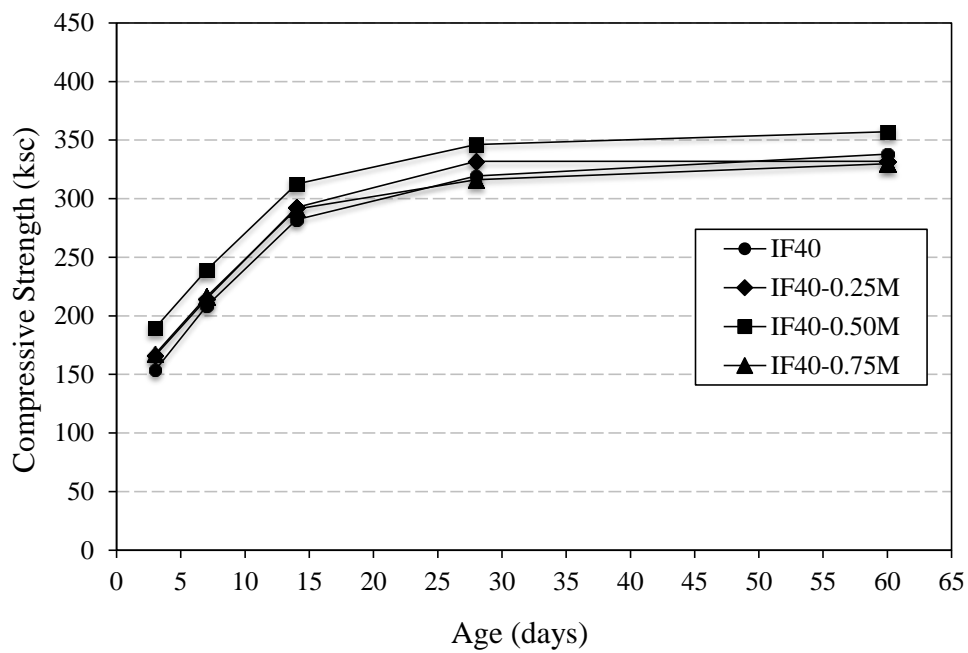
2. กำลังอัดของคอนกรีต

2.1 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

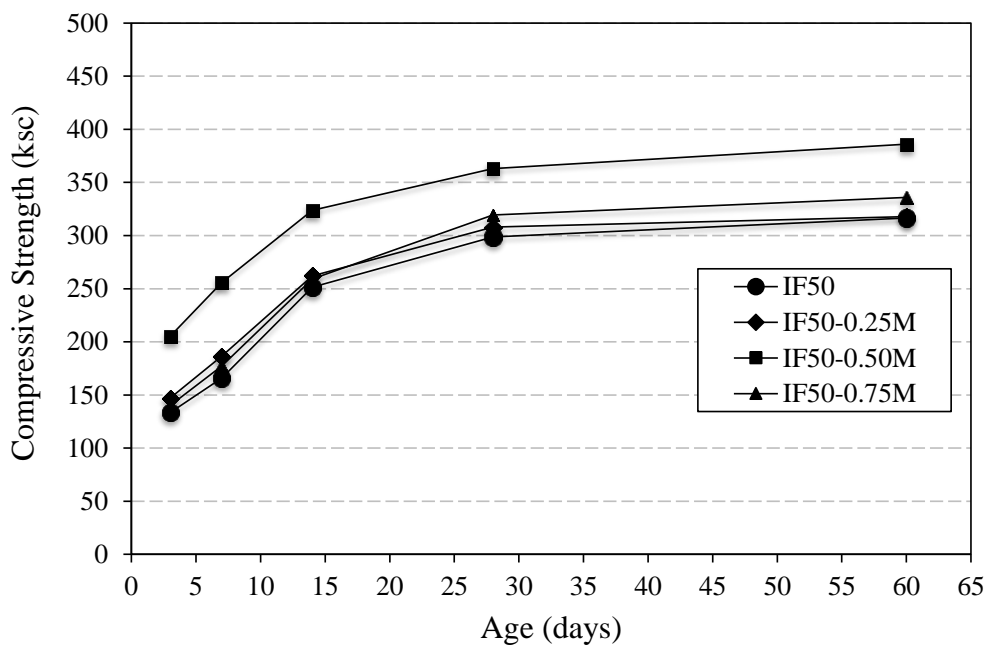
การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ตามระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-11 (ก), 4-11 (ข) และ 4-11 (ค) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกับระยะเวลาบ่มตามลำดับ พบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น โดยมีการพัฒนากำลังอัดในช่วง 14 วันแรก สูงกว่าช่วง 14 วัน ถึง 60 วัน (สังเกตจากความชันของกราฟในช่วง 14 วันแรกจะมีความชันมากกว่า 14-60 วัน) ในช่วงอายุต้นของการบ่มกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำเป็นหลัก จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตในช่วง 7 วันแรก ไม่แตกต่างกันมาก หลังจากนั้นคอนกรีตเริ่มเกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน มีผลให้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต อีกอย่างปฏิกิริยาปอชโซลานของเถ้าถ่านหินเกิดช้าและต้องใช้เวลาานซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bahadure and Naik (2013) ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของวัสดุปอชโซลานที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มต่าง ๆ และการบ่มมีความสำคัญมากที่สามารถทำให้กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่อายุสูงขึ้นไปมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงที่อายุเริ่มต้น (Bahadure and Naik, 2013; ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547; Thomas, 2007) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 3 วัน เท่ากับ 215, 203, 188 และ 202 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาปอชโซลาน มีกำลังอัดระยะต้นสูงอยู่แล้ว จึงมีผลให้การพัฒนากำลังอัดที่แสดงในรูปของร้อยละกำลังอัดที่อายุใด ๆ เทียบกับอายุ 3 วัน มีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4-6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน และใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²)					ร้อยละกำลังอัดเทียบกับอายุ 3 วัน				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
IF 40	153	208	282	319	330	100	136	184	208	215
IF40 - 0.25M	166	215	293	332	338	100	129	176	200	203
IF40 - 0.50M	190	239	313	346	357	100	126	165	183	188
IF40 - 0.75M	167	216	291	326	338	100	129	174	195	202
IF 50	133	166	251	299	317	100	125	189	224	237
IF50 - 0.25M	147	187	262	308	318	100	127	178	210	216
IF50 - 0.50M	205	256	324	363	386	100	125	158	177	188
IF50 - 0.75M	140	177	259	319	336	100	126	185	228	240
IF 60	97	142	208	252	274	100	147	215	261	283
IF60 - 0.25M	106	146	242	265	297	100	139	229	251	281
IF60 - 0.50M	147	205	268	289	311	100	139	182	196	211
IF60 - 0.75M	124	188	250	303	319	100	152	202	245	258

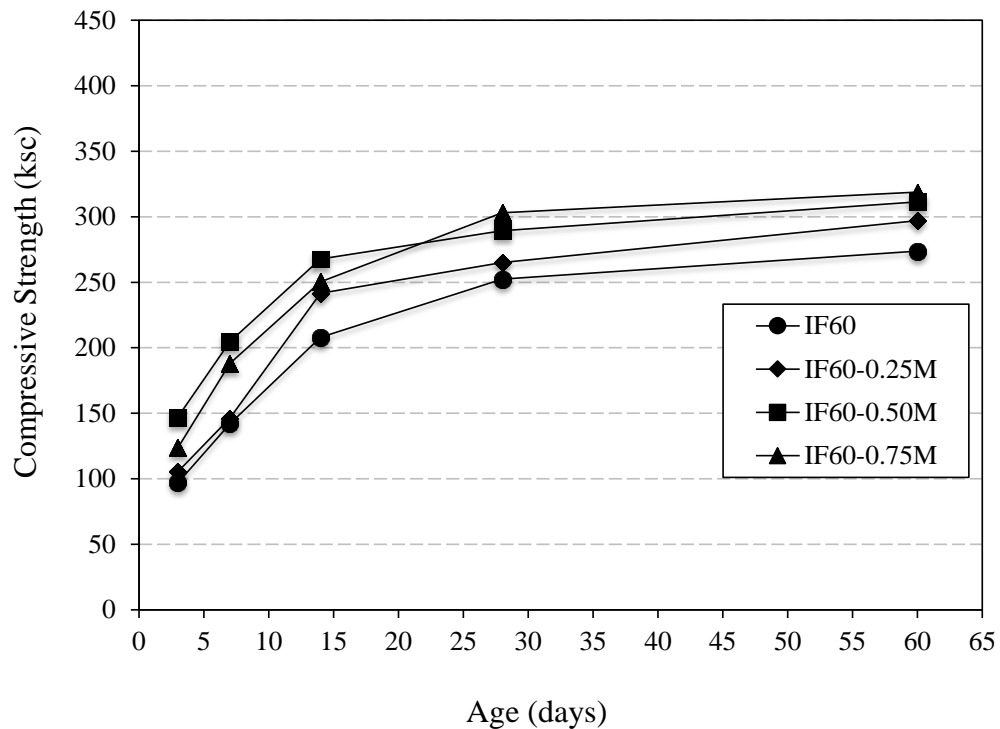


ก. คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40



ข. คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50

ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่มคอนกรีต



ค. คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60

ภาพที่ 4-11 (ต่อ)

2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ดังแสดงภาพที่ 4-12 พบว่า ในทุกกลุ่มการแทนที่ของเถ้าถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมสารละลาย NaOH ในทุกอายุการทดสอบ และมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิกาออกจากเถ้าถ่านหิน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การลดลงของกำลังอัดคอนกรีตเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจ

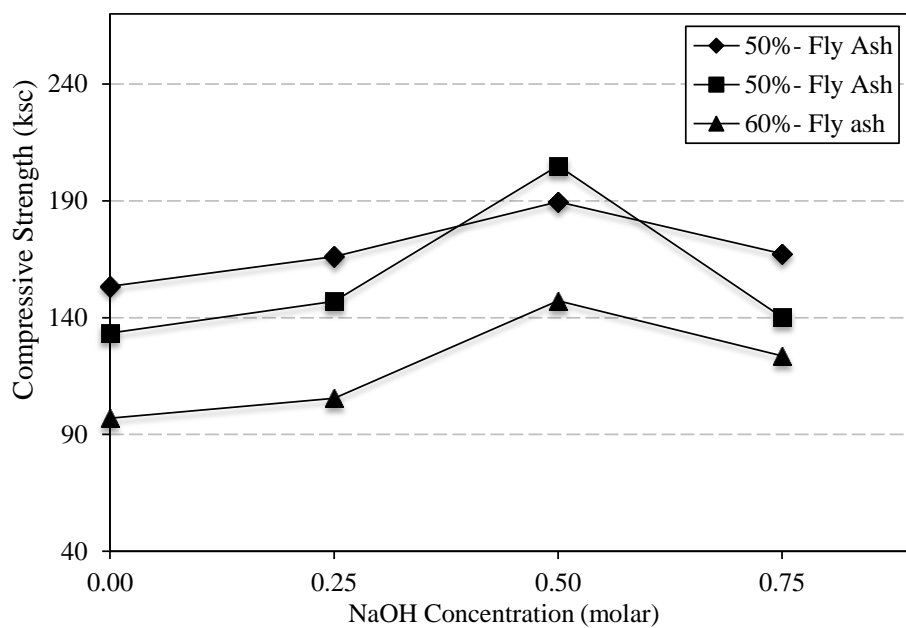
เหลือจากการชะเอาซิลิกาจากเถาถ่านหิน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจอความชื้น จะทำให้มีความหนืดมากขึ้นและส่งผลให้แรงยึดเกาะ ภายในเนื้อคอนกรีตลดต่ำลง ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ (Sodium Hydroxide-NaOH, 2011) เช่น กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินร้อยละ 40 และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 319, 332, 346 และ 326 กก./ซม.² ตามลำดับ การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหินในปริมาณสูงมากกว่าปริมาณต่ำ เช่น คอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้น เท่ากับ 27 กก./ซม.² (เพิ่มจาก 330 กก./ซม.² ในคอนกรีต IF40 เป็น 357 กก./ซม.² ในคอนกรีต IF40-0.50M) ส่วนกลุ่มที่ใช้เถาถ่านหินปริมาณสูง ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเดียวกัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึง 37 กก./ซม.² (เพิ่มจาก 274 กก./ซม.² ในคอนกรีต IF60 เป็น 311 กก./ซม.² ในคอนกรีต IF60-0.50M) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินในปริมาณสูง มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินในปริมาณต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการใช้เถาถ่านหินในปริมาณสูง ส่งผลให้ซิลิกาที่ถูกชะโดยสารละลาย NaOH มีปริมาณมากขึ้น และเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นได้ และการใช้ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสมที่สุด จะสามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงได้สูงสุดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boakye (2012) และ Mustafa and Bakri (2011)

การศึกษาครั้งนี้พบว่า ที่อายุคอนกรีตนานขึ้นเป็น 60 วัน (ภาพที่ 4-12 (จ)) มีผลทำให้คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 เล็กน้อย โดยคอนกรีตควบคุมที่ผสมเถาถ่านหินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 60 วัน ของกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 0.50 โมลาร์ เท่ากับ 311 กก./ซม.² และกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 319 กก./ซม.² เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์ อย่างไรก็ตามการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์ ถึงแม้จะให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 60 วัน สูงที่สุด แต่กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ประกอบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุอื่นที่สูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์ ค่อนข้างชัดเจน ตลอดจนที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าทำให้ต้นทุนการผลิตคอนกรีตลดลงได้

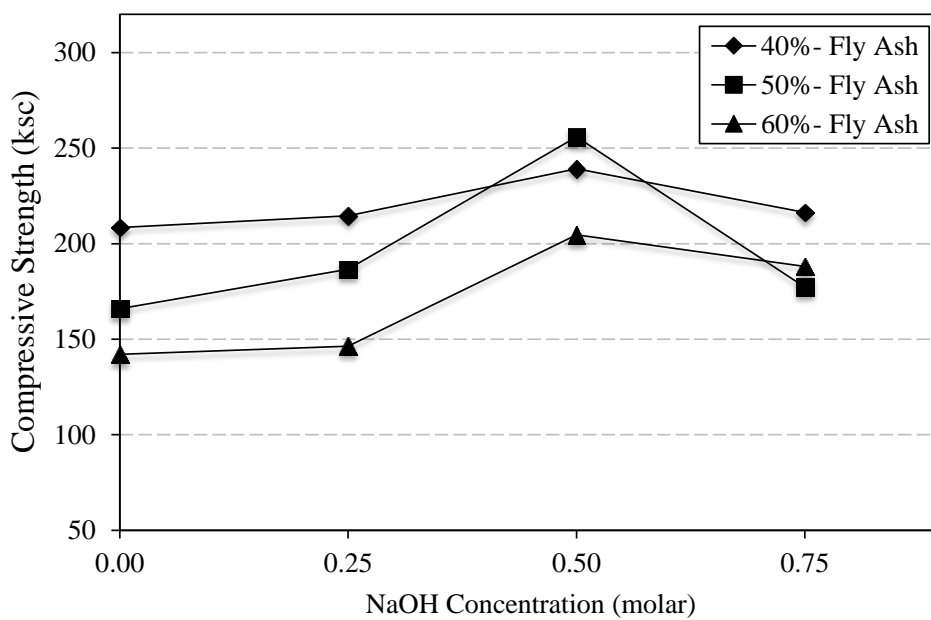
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในรูปของร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม (Normalized compressive strength) ดังตารางที่ 4-7 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน มีค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงชัดเจนมากขึ้นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลดีต่อการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับการใช้งานวิจัยของ Mustafa and Bakri (2011) ที่ใช้ปริมาณของด่างเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุด จะทำให้กำลังรับแรงได้ดีและสูงที่สุดเทียบกับส่วนผสม และดีกว่ากลุ่มควบคุม โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง (ร้อยละ 60) โดยให้ผลในทิศทางเดียวกันทั้งที่อายุต้น (ภาพที่ 4-13 (ก)) และอายุมากขึ้นเป็น 60 วัน (ภาพที่ 4-13 (จ)) เช่น ร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ที่อายุ 3 และ 60 วัน ที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 60 และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 152 และ 114 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

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

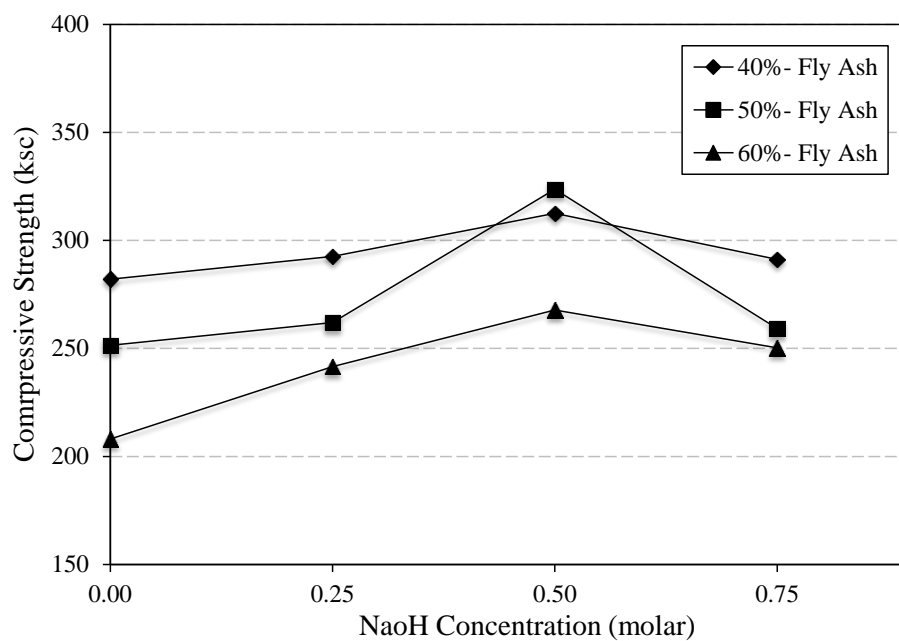


ก. อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน

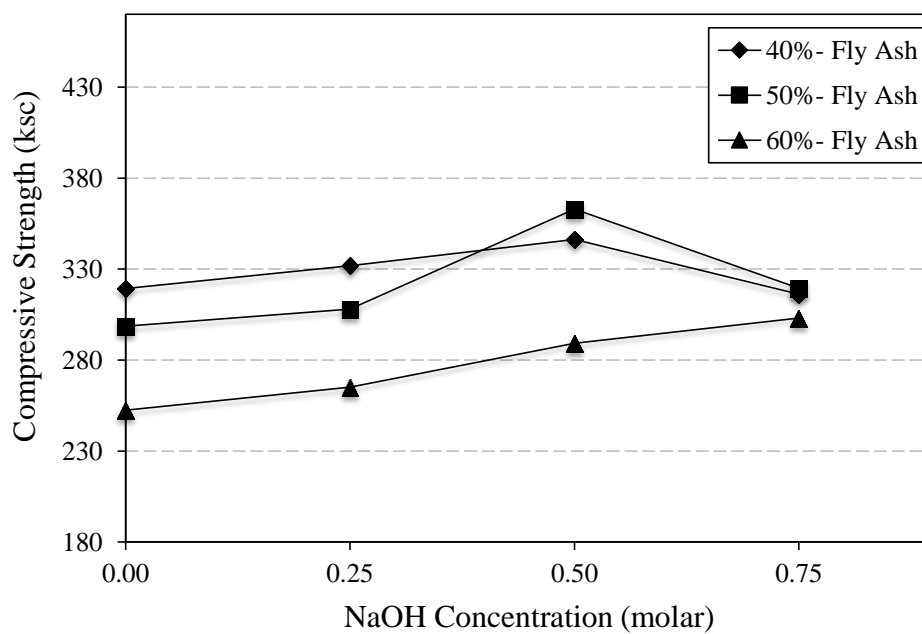


ข. อายุบ่มคอนกรีต 7 วัน

ภาพที่ 4-12 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

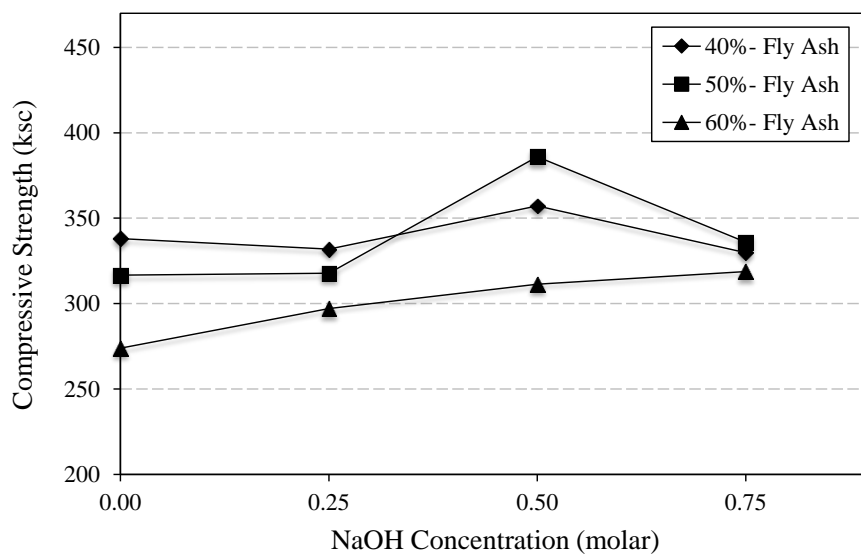


ค. อายุบ่มคอนกรีต 14 วัน



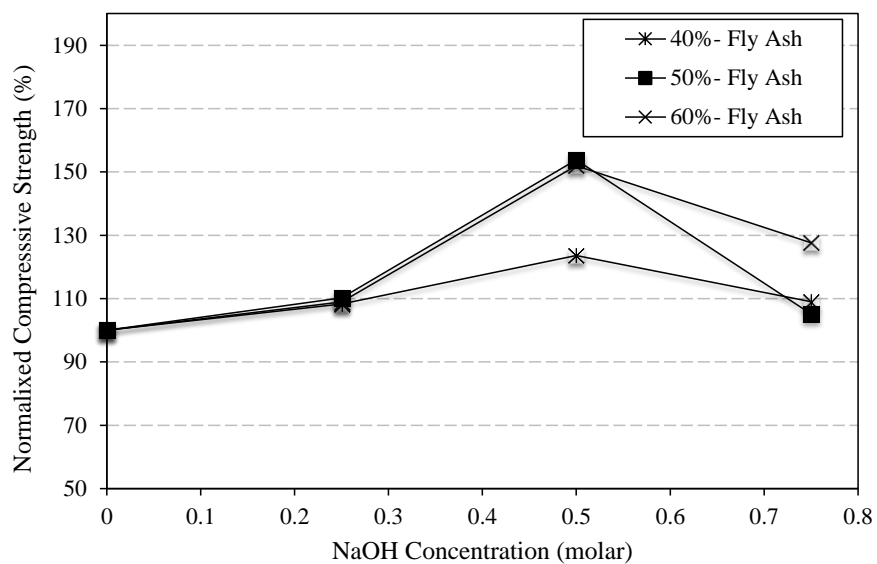
ง. อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน

ภาพที่ 4-12 (ต่อ)



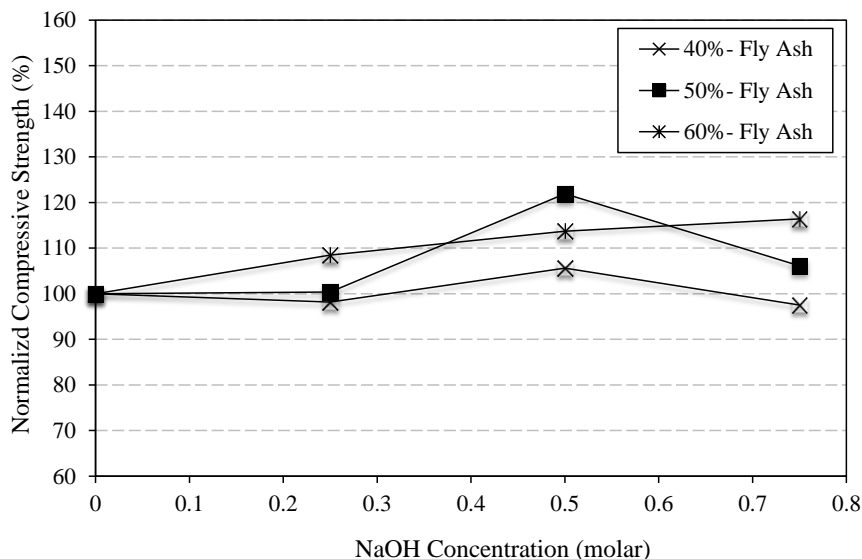
จ. อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

ภาพที่ 4-12 (ต่อ)



ก. อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน

ภาพที่ 4-13 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต เทียบกับกลุ่มควบคุม



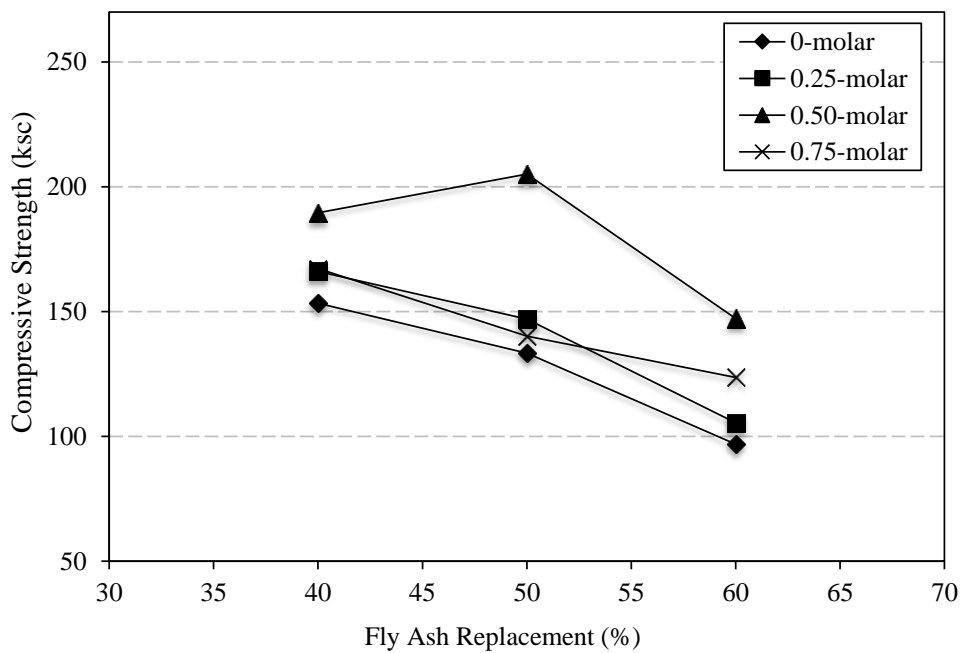
ข. อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

ภาพที่ 4-13 (ต่อ)

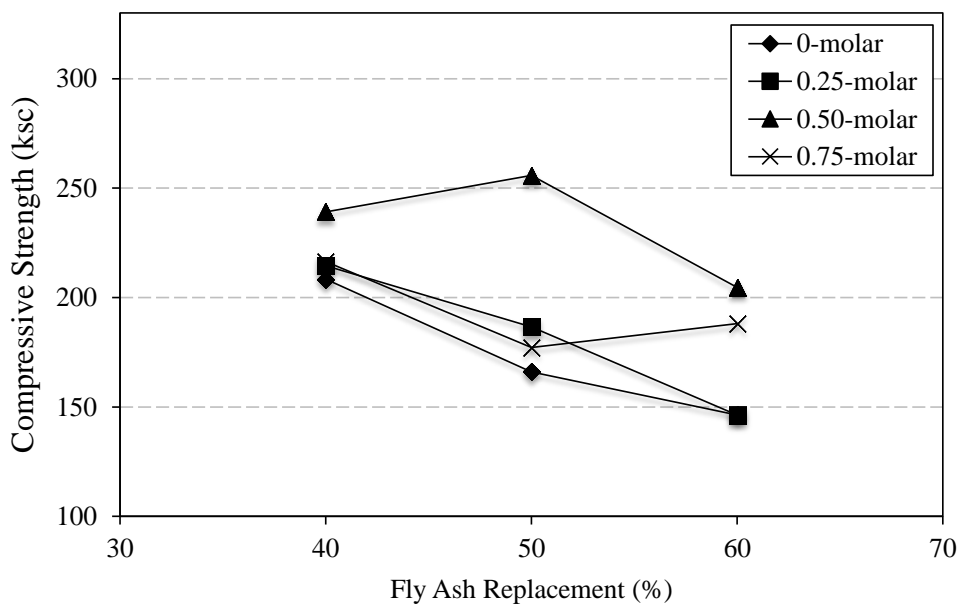
2.3 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ดังภาพที่ 4-14 (ก) 4-14 (ข) 4-14 (ค) 4-14 (ง) และ 4-14 (จ) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีต โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยา เช่น คอนกรีตที่ไม่ได้ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาและผสมเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันลดลงเท่ากับ 67 กก./ชม.² (ลดลงจาก 319 กก./ชม.² ในคอนกรีต IF40 เป็น 252 กก./ชม.² ในคอนกรีต IF60) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt, Chiyasena, and Sirivivatnanon (2009) ที่ได้กล่าวว่า กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะลดลงตามปริมาณของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น (Chindaprasirt, Chiyasena, & Sirivivatnanon, 2009; Karim, Zain, Jamil, Lai, & Islam, 2011; ACI 318) เนื่องจากว่าปฏิกิริยาในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปริมาณของเถ้าถ่านหินได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนค์ประเภทที่ 1 เมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะดีขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ในขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลงแค่ 57 กก./ซม.² (ลดลงจาก 346 กก./ซม.² ในคอนกรีต IF40-0.50M เป็น 289 กก./ซม.² ในคอนกรีต IF60-0.50M) และมีแนวโน้มเหมือนกันในคอนกรีตทุกอายุการบ่ม ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้นในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมต่างเร่งปฏิกิริยาทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย (Owen, 1979; Lane and Best, 1982) ประกอบกับเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตน้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหิน จึงมีผลชัดเจนต่อการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ พบว่า มีผลทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และให้กำลังอัดดีขึ้น ซึ่งสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ และสูงสุดเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 50 ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากสารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกา จากเถ้าถ่านหินมาทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ที่ให้กำลังกับคอนกรีตได้ดีขึ้น (Lane and Best, 1982; Helmut, 1987; Jonhson, 1981) แสดงให้เห็นว่า สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเหมาะสม สามารถใช้เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malhotra and Rameszianpour (2011) และ ACI 318 ที่กล่าวว่า สำหรับส่วนผสมที่ใช้เถ้าถ่านหินไม่มากเกินไป หรือปริมาณที่เหมาะสมทำให้กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนาได้ดี และสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

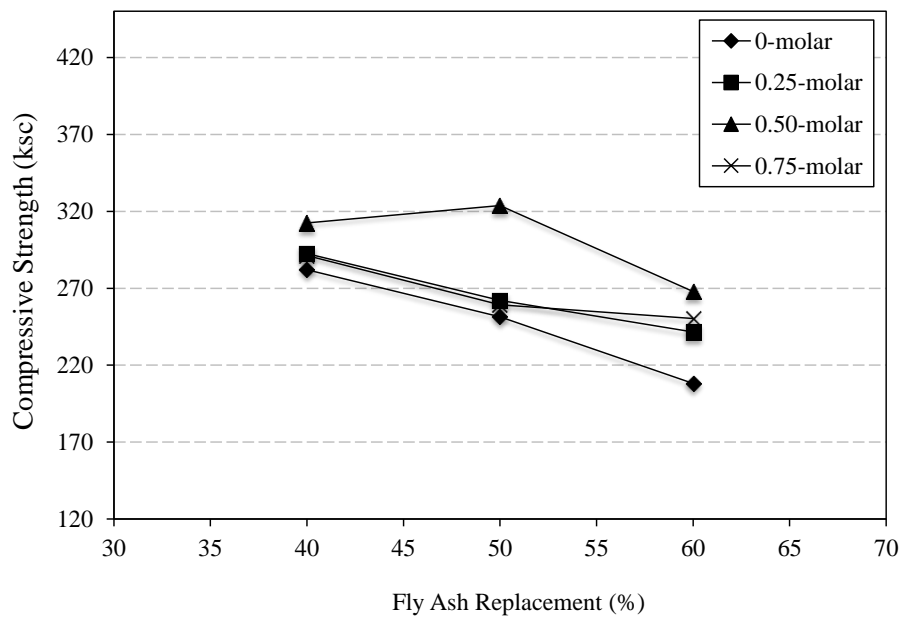


ก. อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน

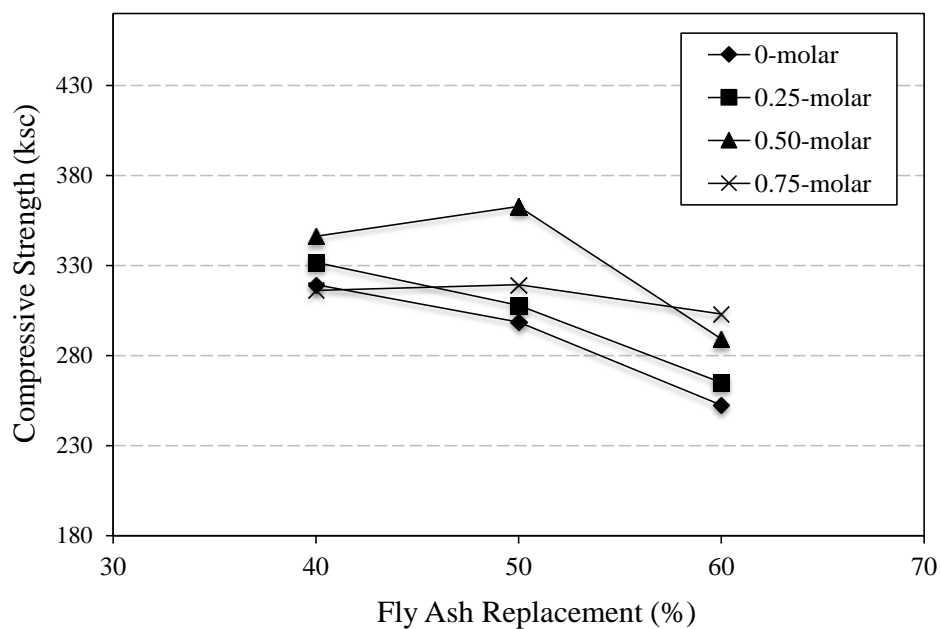


ข. อายุบ่มคอนกรีต 7 วัน

ภาพที่ 4-14 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีต

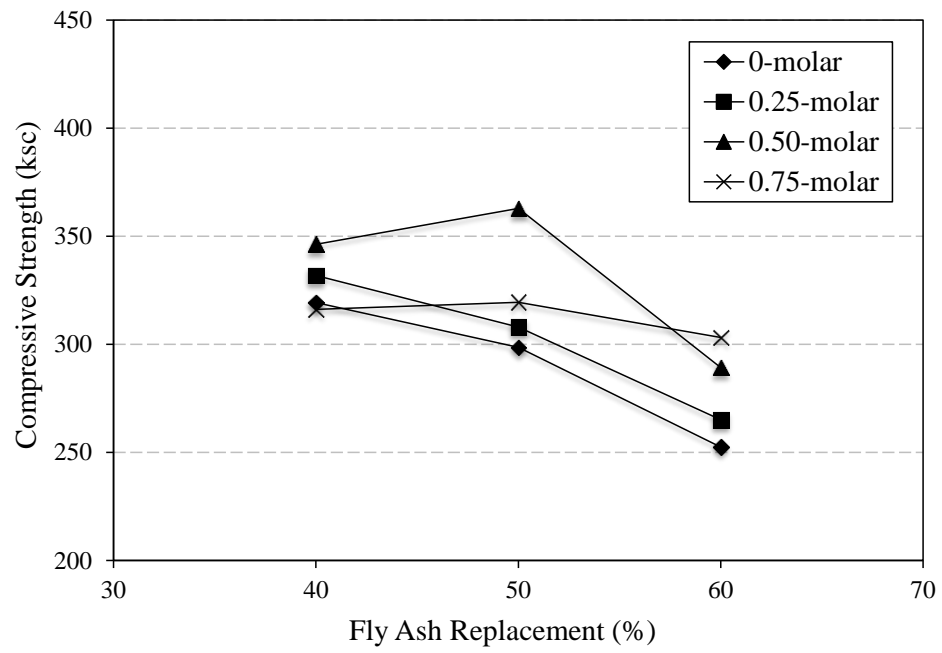


ค. อายุบ่มคอนกรีต 14 วัน



ง. อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน

ภาพที่ 4-14 (ต่อ)



จ. อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

ภาพที่ 4-14 (ต่อ)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองงานวิจัย สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. สมบัติของเพสต์

1.1 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายของ NaOH เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของเพสต์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในทุกส่วนผสม และเมื่อปริมาณของเถ้านหินที่ผสมในเพสต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของเพสต์ลดลง

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

2. สมบัติของมอร์ตาร์

2.1 การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในทุกกลุ่ม การแทนที่ของเถ้านหินที่ใช้สารละลาย ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มควบคุม และสูงสุดในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์

2.2 การใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้านหินผสมในมอร์ตาร์ร้อยละ 50 โดยวัสดุประสาน ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด โดยทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุมได้ถึงร้อยละ 46

2.3 การใช้เถ้านหินผสมในมอร์ตาร์ในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่ใช้ใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยาน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้สารละลาย NaOH

2.4 การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และให้กำลังอัดดีขึ้น โดยสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กลับส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นได้

3. สมบัติของคอนกรีต

3.1 เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูงขึ้นช่วยเพิ่มค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้สูงขึ้น

3.2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ในทุกกลุ่มการแทนที่มีกำลังอัดสูงขึ้น แต่การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง

3.3 ที่อายุบ่มคอนกรีตนานถึง 60 วัน พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสูงขึ้นได้ใกล้เคียงกับกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์

3.4 การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีต ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.5 การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 50 โดยวัสดุประสาน มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 22 ที่อายุ 28 วัน

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทดสอบในงานวิจัยได้ใช้ค่าแรงปฏิกิริยาที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมวลรวมกับด่างอัลการไล (Alkaline aggregate reaction) ควรศึกษาเพิ่มเติม และทดลองเกี่ยวกับการขยายตัวของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างมวลรวมกับด่างอัลคาไลน์ (Alkaline)
2. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ โครงสร้างจุลภาคของเพสต์เมื่อมีการใช้ค่าแรงปฏิกิริยาทุก ๆ ความเข้มข้นและเถ้าถ่านหิน

3. ศึกษาเพิ่มเติมกับการเอาไปใช้งานจริงและสอดคล้องกับแนวปฏิบัติของการใช้งาน เช่น การทำอิฐบล็อก หรืออาจเอาไปทำเป็นชิ้นส่วนของคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อให้สอดคล้องกับงานจริงมากขึ้น เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กนกเนตร ชื่นนุกุ่ม, วิศรา โกระวิโยธิน และวิเชียร ชาลี. (2557). *ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน*. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2554). *การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต (พิมพ์ครั้งที่ 3) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2551). *การใช้วัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และวิเชียร ชาลี. (2553). *กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน*. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา.
- ธีรทรัพย์ รัตชนภาส. (2545). *ผลกระทบของวัสดุปอชโซลานที่มีต่อกำลังอัดและการกัดกร่อนเนื่องจาก สารละลายกรดซัลฟูริกของคอนกรีต*. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). *เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง)*. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ประจิด จิรัปปภา. (2526). *คอนกรีตผสมซีเมนต์เถ้าลอยแม่เมาะ*. สัมมนาทางวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบทครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. (2528). *ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์เถ้าลอยแม่เมาะสำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท*. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอาภา สชนเสาวภาคย์. (2550). *การพัฒนาคุณภาพของเถ้าหนักโดยผสมร่วมลับเถ้าแกลบ*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อ
จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต. รายงานโครงการหมายเลข CE 2012-21.

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 C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Annual Book of
ASTM Standards.

ASTM C150, Standard Specification for Portland cement. Annual Book of ASTM Standards.
Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C187, Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. Annual Book
of ASTM Standards.

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

ASTM C230, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C305, Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic
Consistency. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C311, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for
Use in Portland-Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for
Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards 2001.

- 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, 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, 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*.
- Chindapasirt, P., Chiyasena, T., & Sirivivatnanon, V. (2009). High Strength concrete containing fly ash and black boiler rice husk ash. *Proceedings of the 4th Symposium on Infrastructure*, 363-368.
- Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., & Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34, 1087-1092.
- Duo, Y., Yonghao, F., Chenhui, Z., Yongfan, G., & Yamin, G. (2016). Preparation and properties of alkali-activated cement containing phosphorous slag and fly ash. *Ceramics-Silikáty*, 63-67.
- Gopalan, M. K. (1993). Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 90-M12, 3-28.
- Helmut, R. (1987). Fly ash in cement and concrete. *Portland Cement Association*.
- Jaturapitakkul, C., Kiattkomol, K., Siripanichkorn, A., & Kunchorn, T. (1999). Strength activity index of single size fly ash mixed with Portland cement type I and type III. *Proceedings of the 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*.
- Jonh, N., & Ban, S. C. (2003). Advanced Concrete Technology: Constituent Materials. *Imperial College and Napier University*.

- Jonhson, B. D. G. (1981). The use of fly ash in Cape Town RMC operation. *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, S252/33.
- Lane, R. O. and Best, J. F. (1982). Properties and use of fly ash in portland cement concrete. *Concrete International*, 4, 81-92.
- Karim, M. R., Zain, M. F. M., Jamil, M., Lai, F. C., & Islam, M. N. (2011). Strength development of mortar and concrete containing fly ash: A review. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(17), 4137-4153.
- Kejin, W., Surendra, P. S., & Alexander, M. (2003). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders. *Cement and Concrete Research*, 34, 299-309.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., & Chutibtim, S. (2001). A study of ground fly ashes with different fineness from various sources as pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites*, 23, 335-43.
- Martinez, R. and Palomo, A. (2001). Microstructure, properties and materials. 3ed, *McGraw-Hill, United State of America*.
- Molhotra, V. M., & Rameszianpour, A. A. (1994). Fly ash in concrete, Canada. *Centre for Mineral and Energy Technology*, 307.
- Mustafa, A. M., & Bakri A. L. (2011). The processing, Characterization and properties of fly ash based geopolymer concrete. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 30, 90-97.
- Mustafa, A. M., and Bakri, A. L. (2011). Microstructure of different NaOH molarity of fly ash based green polymeric cement," *Journal of Engineering and Technology Research*, 3, 44-49.
- Owen, P. L. (1979). Fly ash and its usage in concrete. *The journal of Concrete Society*, 13, 21-26.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Peris-Mora, E., & Ordonez, L. M. (2000). Studies on crystalline rice husk ashes and the activation of their pozzolanic properties. *Waste Mater. Constr.*, 493-503.

- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999b). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cem. Con. Res.*, 29, 997-1004.
- Poon, C.S., Qiao, X. C., & Lin, Z. S. (2003). Pozzolanic properties of reject fly ash in blended cement paste. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1857-1865.
- 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, 205-214.
- Puertas, F., Martinez-Ramirez, S., Alonso S., & Vazquez, T. (2000). Alkali-activated fly ash/slag cement strength behavior and hydration products. *Cement and Concrete Res.*, 30, 1625-1632.
- Ramin, H. K., Johnson, U. A., & Mohd, Z. J. (2014). The Effect of Different Parameters on the Development of Compressive Strength of Oil Palm Shell Geopolymer Concrete. *The Scientific World Journal*, 16.
- Rezaul, K., Maruf, H., Nabi, N. K., Fauzi, M. Z., Maslina, J., & Fook C. L. (2014). On the Utilization of Pozzolanic Wastes as an Alternative Resource of Cement. *Open Access Materials*, 7,7809-7827.
- Rilem, (1991). Fly ash in Concrete, properties and performance, Report of technical committee 67-FAB. *Use of fly ash in building*, 255.
- Risdanareni, P., Januarti, J. E., & Triwulan (2014). The Influence of Alkali Activator Concentration to Mechanical Properties of Geopolymer Concrete with Trass as a Filler. *Materials Science Forum*, 803, 125-134.
- Sakonwan, H., Sitchai, H., Prasit, T., Santi, M., & Vanchai, S. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.

- Samarin, A., Munn, R. L., & Ashby, J. B. (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, 143-172.
- Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., & Srinivasan, S. (2003). Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 673-680.
- Shetty, M. S., (1982). Concrete Technology: Theory and Practice. *College of Military Engineering*.
- Sodium Hydroxide-NaOH, (2011). Product file: Cas# 1310-73-2. *Management of ocular and cutaneous chemical splashes*.
- Thomas, M. (2007). Optimizing the use of fly ash in concrete. *Portland Cement Association*, IS. 548.
- Ubolluk, R. & Prinya, C. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*. 1073–1078.
- Wu, X., Jiang, W., & Roy D. M., (1990). Early activation and properties of slag cement. *Cement and Concrete Research*, 20, 961-974.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF COARSE

AGGREGATE

วันที่ 10-16/12/2015

รายการ	ตัวอย่างที่	
	No.1	No.2
น้ำหนักตัวอย่างสภาพ SSD (g): B =	1000.00	1000.00
น้ำหนักตระกร้าในน้ำ (g) =	982.50	982.80
น้ำหนักตระกร้า + ตัวอย่างในน้ำ (g) =	1614.20	1615.50
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง + ภาด (g) =	1126.00	1337.00
น้ำหนักของตัวอย่างในน้ำ (g): C =	631.70	632.70
น้ำหนักอบแห้งในอากาศ (g): A =	996.00	991.00
ภาด (g) =	130.00	346.00
S.G (SSD) ₁ =	2.715	S.G: SSD
S.G (SSD) ₂ =	2.723	(Average) =
Absorption ₁ (%) =	0.402	Absorption
Absorption ₂ (%) =	0.908	(Average) =
		2.719
		0.655

ตารางภาคผนวกที่ ก-2 SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF FINE AGGREGATE
วันที่ 10-16/12/2015

รายการ	ตัวอย่างที่	
	No. 1	No. 2
น้ำหนักตัวอย่างสภาพ SSD (g)	500.00	500.00
น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ (g)	1220.00	1219.00
น้ำหนักขวดแก้ว + ตัวอย่าง + น้ำ (g) =	1530.00	1526.00
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง + ถาด (g) =	773.00	622.00
น้ำหนักขวดแก้ว (g) =	225.00	226.00
ปริมาตรของขวดแก้ว , V (mL) =	1000	1000
ถาด (g) =	277.00	126.00
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง, A (g) =	496.00	496.00
น้ำหนักน้ำที่เติมลงไปในขวด W(g) =	805.00	800.00
S.G ₁ (SSD) =	2.632	S.G: SSD
S.G ₂ (SSD) =	2.591	(Average) =
Absorption ₁ (%) =	0.806	Absorption
Absorption ₂ (%) =	0.806	(Average) =

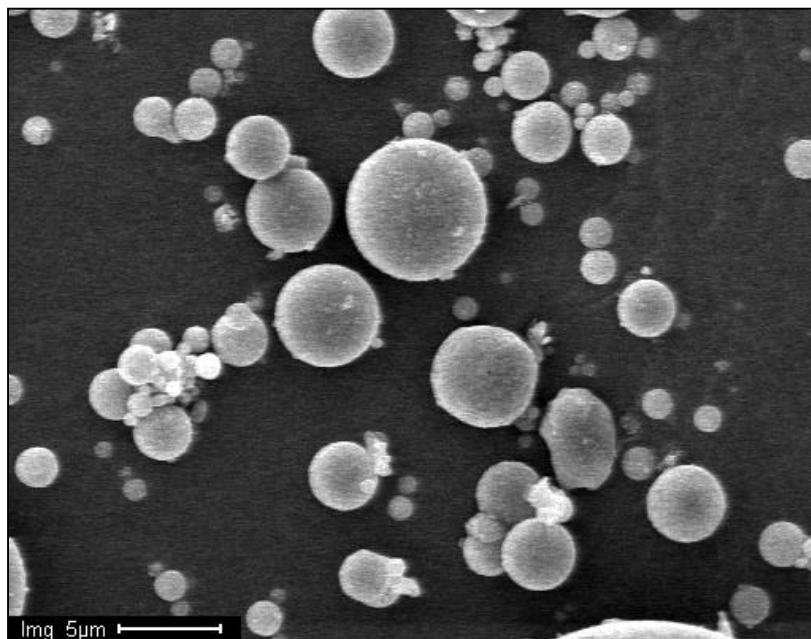
ตารางภาคผนวกที่ ก-3 SPECIFIC GRAVITY OF FLY ASH

วันที่ 10-16/12/2015

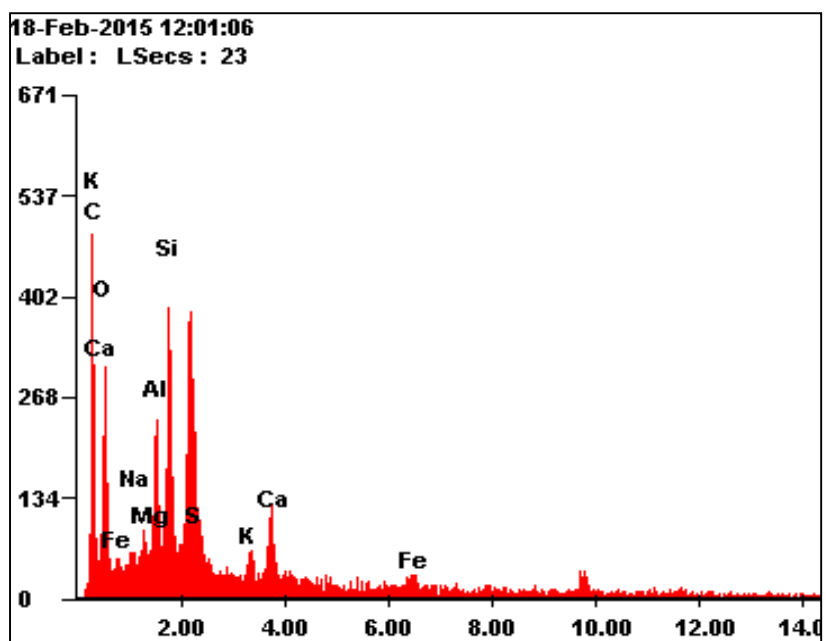
รายการ	ตัวอย่างที่	
	No. 1	No. 2
จีกระดับของเหลวเริ่มต้น (mL): V_1	0.50	0.70
อุณหภูมิเริ่มต้น kerosene ($^{\circ}\text{C}$): T_1	26.20	26.00
น้ำหนักแก้วลอยและภาชนะตอนเริ่มต้น (g): W_1	100.00	97.00
จีกระดับของเหลวสุดท้าย (mL) : V_2	20.50	22.50
อุณหภูมิสุดท้าย Kerosene ($^{\circ}\text{C}$): T_2	27.10	27.30
น้ำหนักแก้วลอยและภาชนะตอนสุดท้าย (g): W_2	54.00	50.00
S.G (FA) ₁ =	2.300	
S.G (FA) ₂ =	2.156	
S.G (average) =	2.228	

ตารางภาคผนวกที่ ก-4 คุณสมบัติของแก้ว่านหินจากการทำ EDX วันที่ 18/02/2015

Element	W _i %	A _i %
C	53.33	67.4
O	22.19	21.06
Na	0.59	0.39
Mg	0.75	0.47
Al	4.25	2.39
Si	7.45	4.03
S	3.14	1.48
K	1.16	0.45
Ca	3.69	1.4
Fe	3.45	0.94



ภาพภาคผนวกที่ ก-1 ภาพขยายของอนุภาคของเถ้าถ่านหินโดย SEM ขยาย 300x



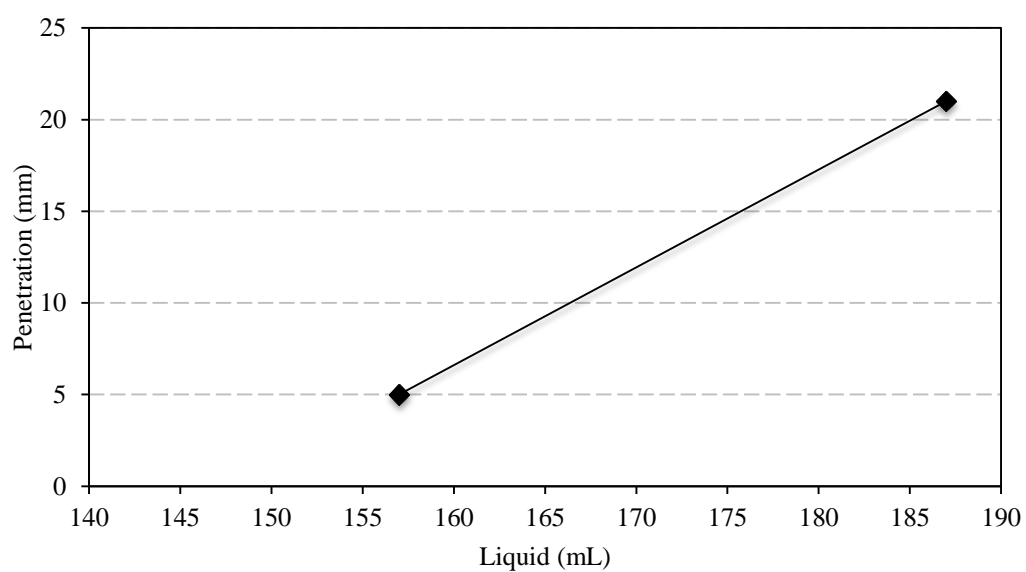
ภาพภาคผนวกที่ ก-2 กราฟแสดงถึงปริมาณของสารเคมีโดย EDX

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติของเพสท์

1. สำหรับส่วนผสมควบคุม IF30

ตารางภาคผนวกที่ ข-1-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

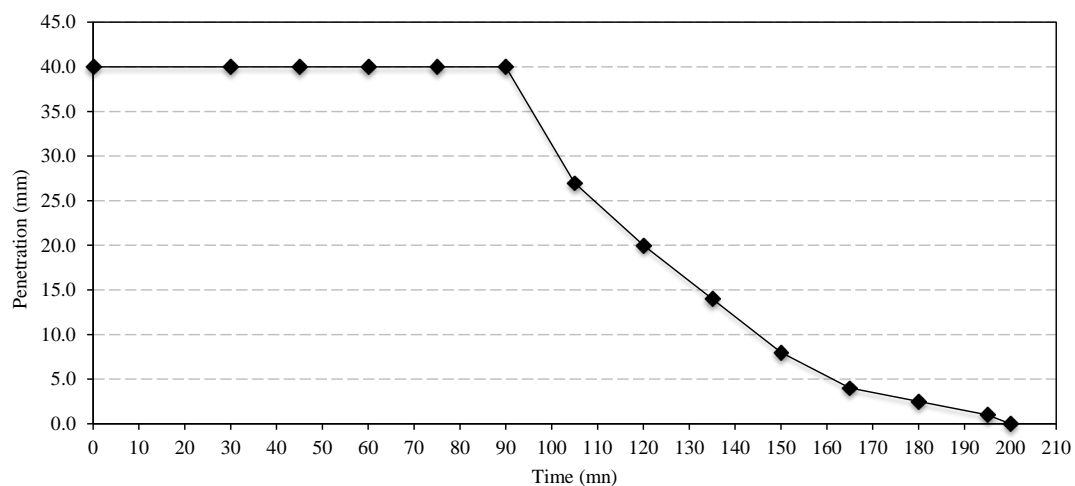
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	157	5
	187	21
L =	166	At 10 mm
W/B =	0.255	



ภาพภาคผนวกที่ ข-1-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-1-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
12:17	40.0	0	0
12:47	40.0	30	30
13:02	40.0	15	45
13:17	40.0	15	60
13:32	40.0	15	75
13:47	40.0	15	90
14:02	27.0	15	105
14:17	20.0	15	120
14:32	14.0	15	135
14:47	8.0	15	150
15:02	4.00	15	165
15:17	2.50	15	180
15:32	1.00	15	195
15:47	0.00	15	200

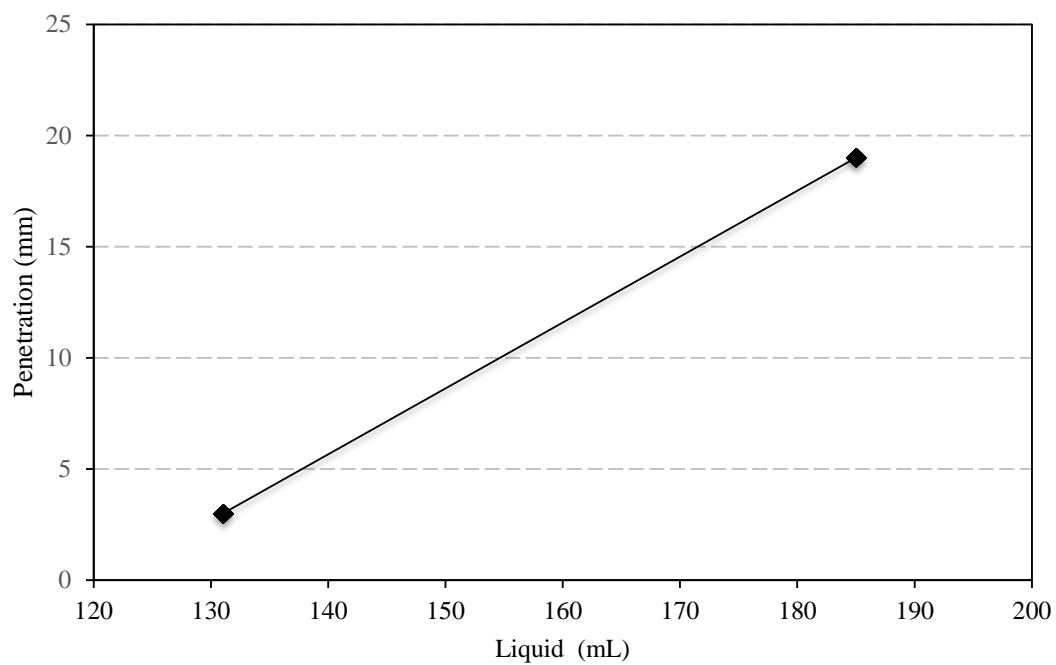


ภาพภาคผนวกที่ ข-1-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

2. สำหรับส่วนผสมควบคุม IF30-0.25M

ตารางภาคผนวกที่ ข-2-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

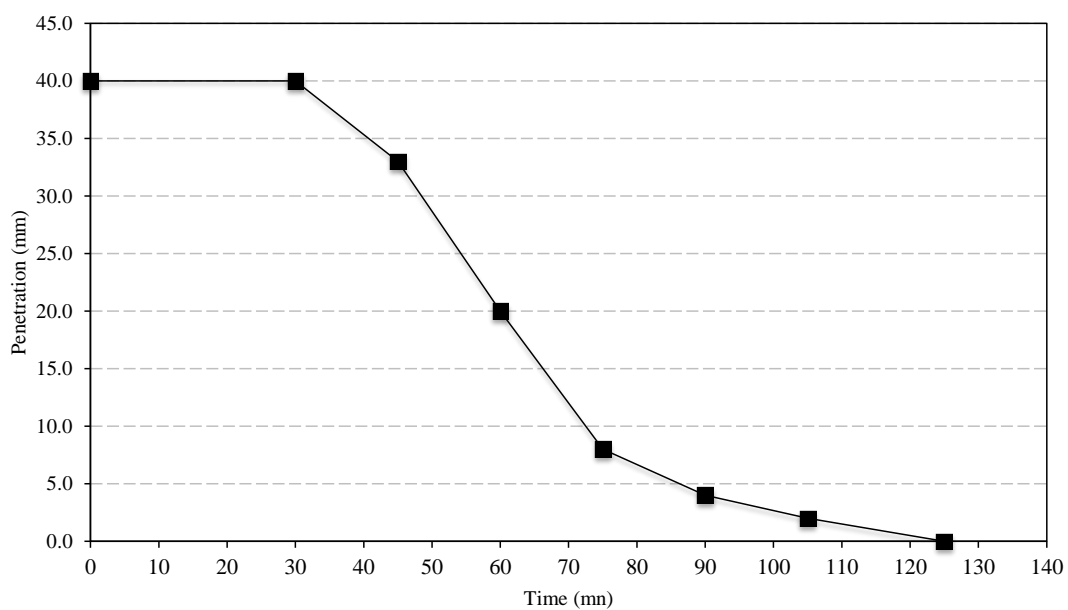
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	131	3
	185	19
L =	155	At 10 mm
W/B =	0.239	



ภาพภาคผนวกที่ ข-2-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-2-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
15:00	40.0	0	0
15:30	40.0	30	30
15:45	33.0	15	45
16:00	20.0	15	60
16:15	8.0	15	75
16:30	4.00	15	90
16:45	2.00	15	105
17:00	0.00	15	125

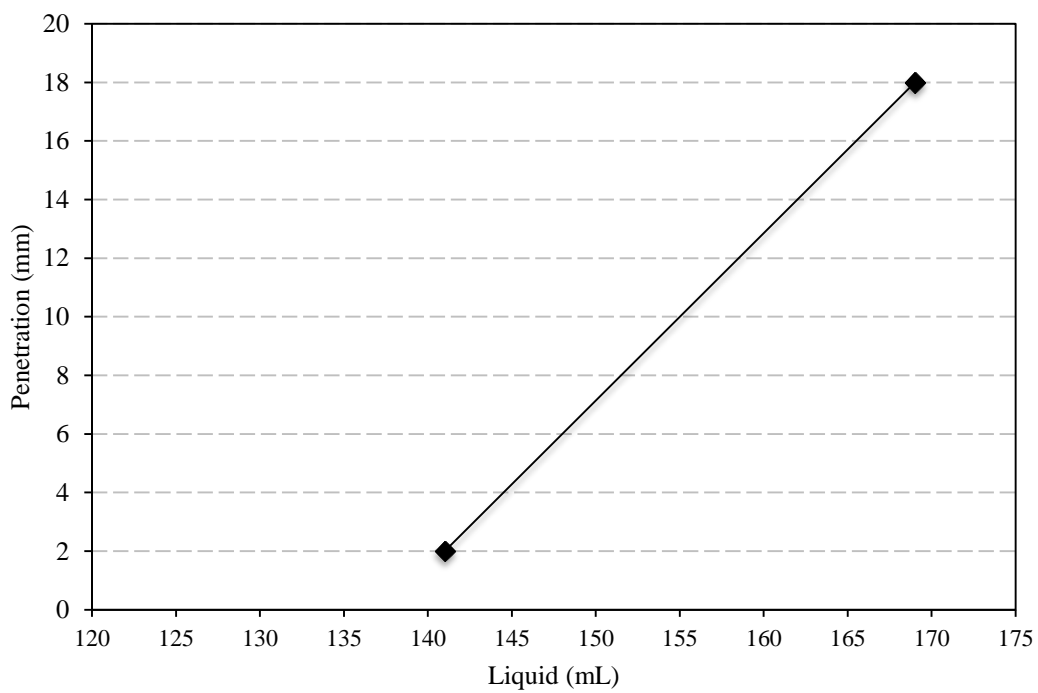


ภาพภาคผนวกที่ ข-2-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

3. สำหรับส่วนผสมควบคุม IF30-0.50M

ตารางภาคผนวกที่ ข-3-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

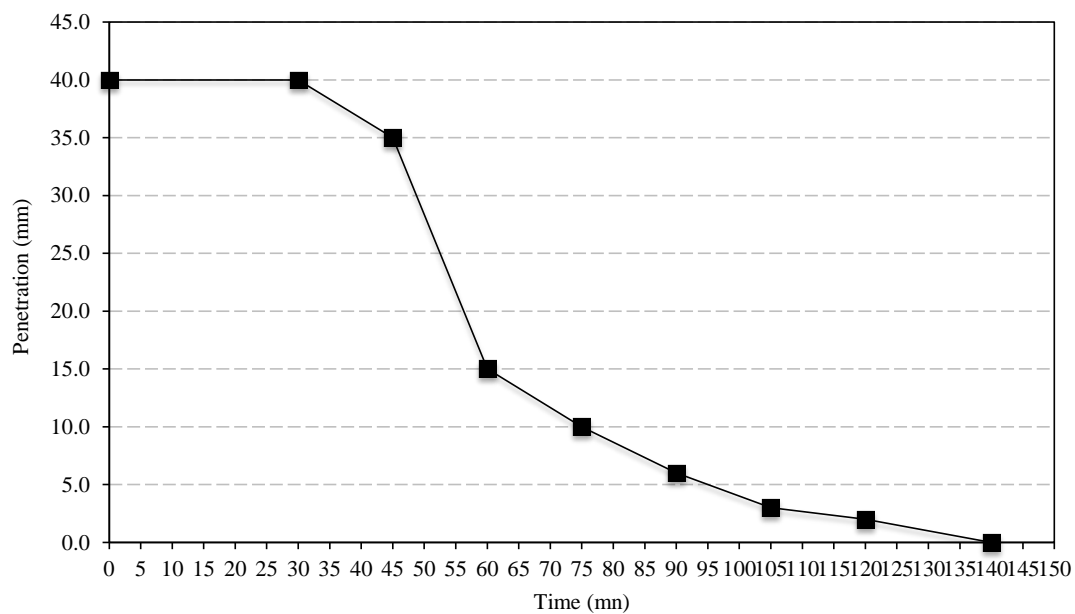
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	141	2
	169	18
L =	147	At 10 mm
W/B =	0.226	



ภาพภาคผนวกที่ ข-3-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-3-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
14:47	40.0	0	0
15:02	40.0	30	30
15:17	35.0	15	45
15:32	15.0	15	60
15:47	10.0	15	75
16:02	6.0	15	90
15:32	3.00	15	105
15:47	2.00	15	120
16:02	0.00	15	140

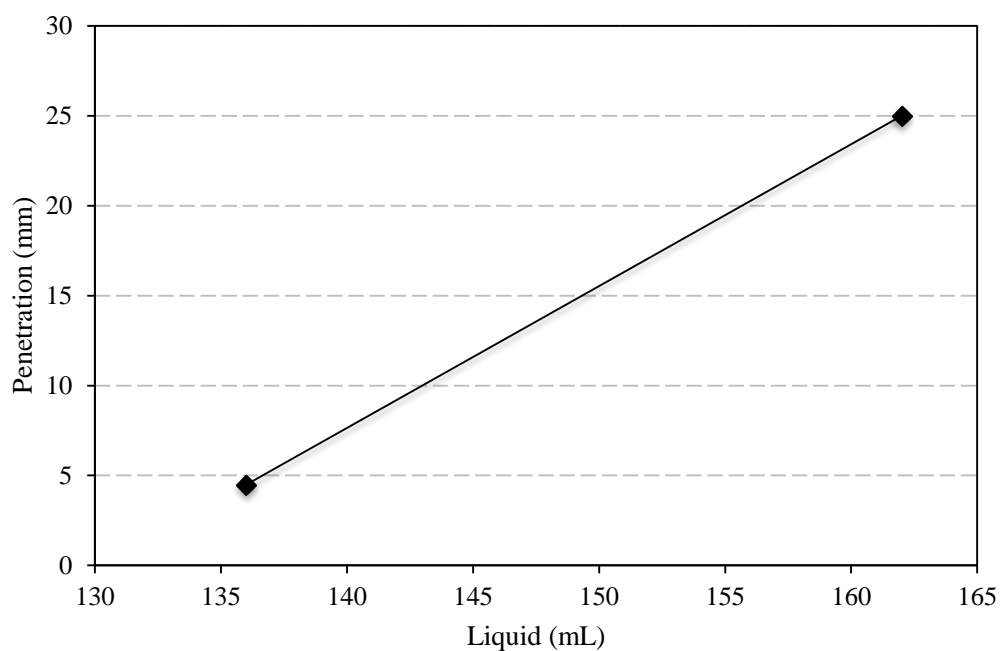


ภาพภาคผนวกที่ ข-3-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

4. สำหรับส่วนผสมควบคุม IF30-0.75M

ตารางภาคผนวกที่ ข-4-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

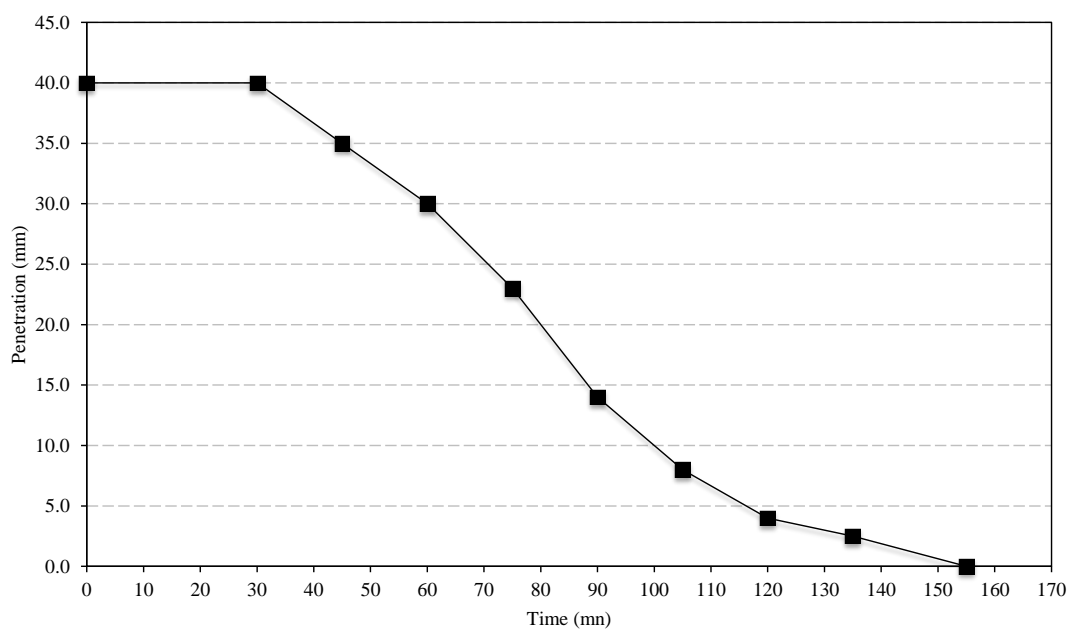
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	136	4.5
	162	25
L =	143	At 10 mm
W/B =	0.220	



ภาพภาคผนวกที่ ข-4-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-4-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
13:17	40.0	0	0
13:32	40.0	30	30
13:47	35.0	15	45
14:02	30.0	15	60
14:17	23.0	15	75
14:32	14.0	15	90
14:47	8.0	15	105
15:02	4.00	15	120
15:17	2.50	15	135
15:32	0.00	15	155

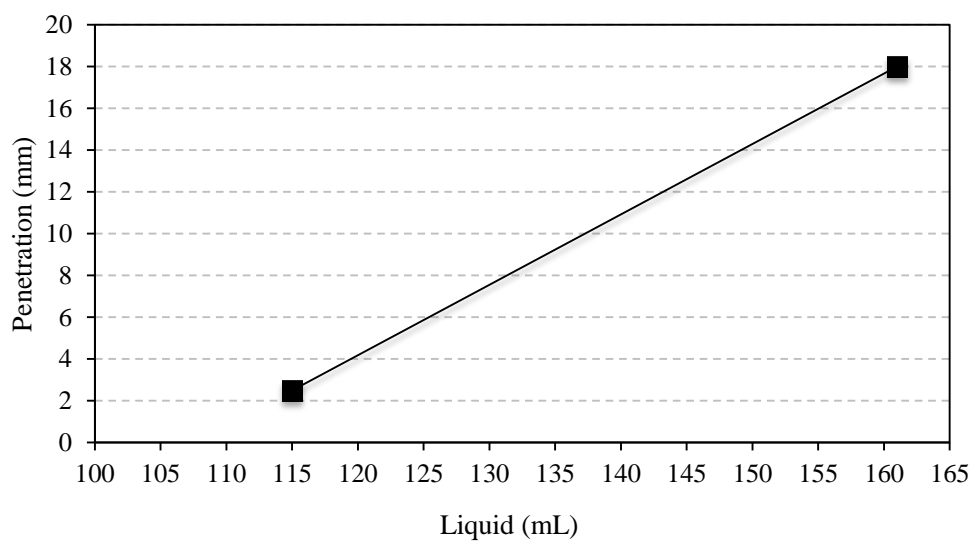


ภาพภาคผนวกที่ ข-4-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

5. สำหรับส่วนผสมควบคุม IF30-1.0M

ตารางภาคผนวกที่ ข-5-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

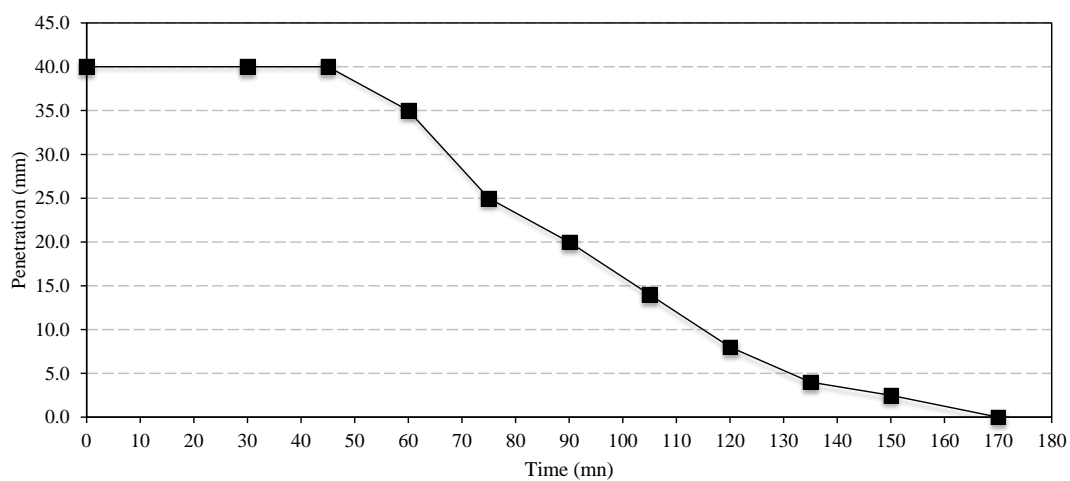
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	115	2.5
	161	18
L =	137	At 10 mm
W/B =	0.211	



ภาพภาคผนวกที่ ข-5-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-5-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
13:32	40.0	0	0
13:47	40.0	30	30
14:02	40.0	15	45
14:17	35.0	15	60
14:32	25.0	15	75
14:47	20.0	15	90
15:02	14.0	15	105
15:17	8.0	15	120
15:32	4.00	15	135
15:47	2.50	15	150
16:02	0.00	15	170

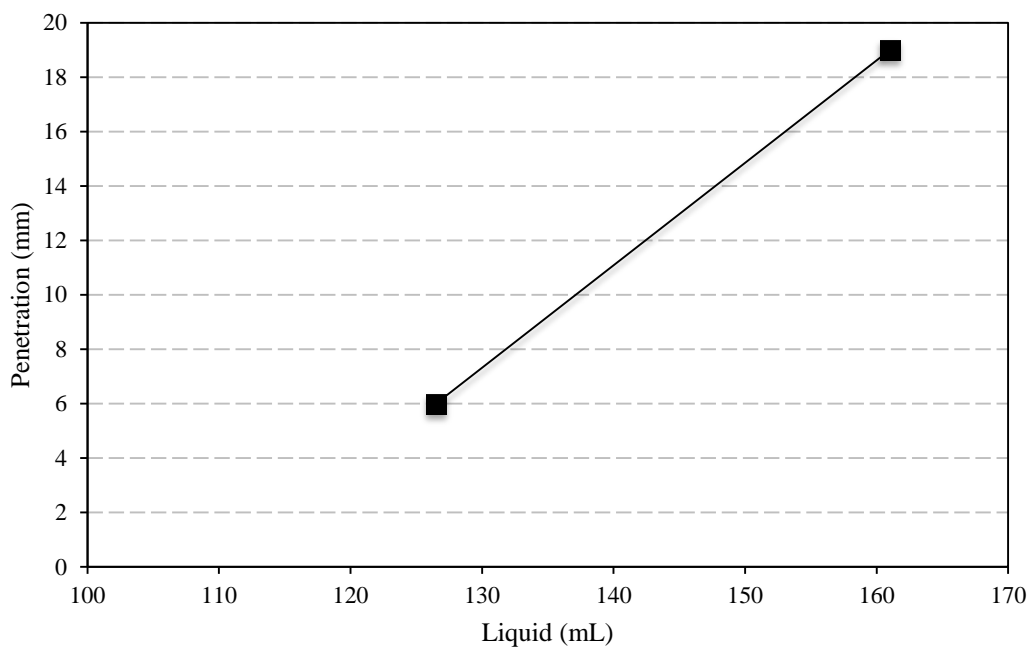


ภาพภาคผนวกที่ ข-5-1 การหาการก่อดัวของเพสต์

6. สำหรับส่วนผสมควบคุม IF30-1.25M

ตารางภาคผนวกที่ ข-6-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

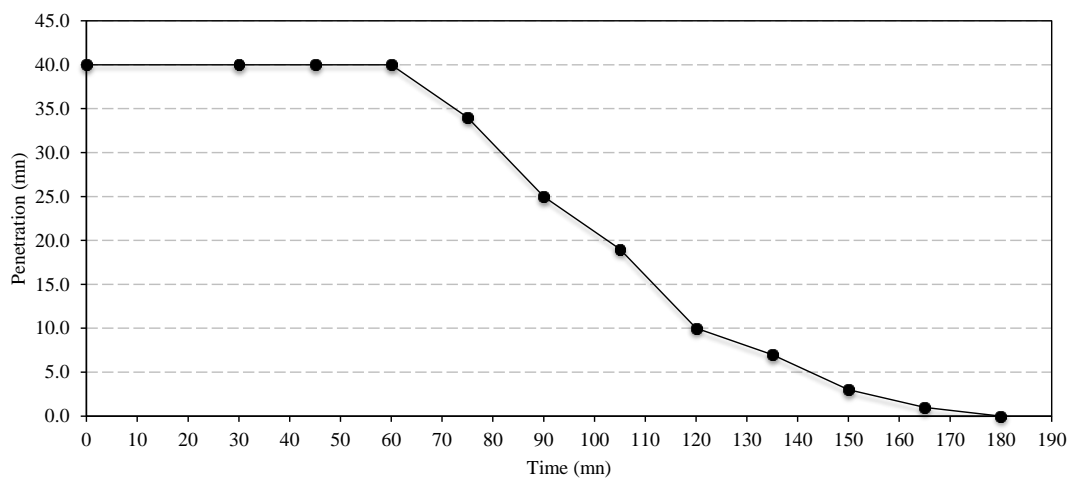
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	126.5	6
	161	19
L =	135	At 10 mm
W/B =	0.2077	



ภาพภาคผนวกที่ ข-6-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-6-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
12:17	40.0	0	0
12:47	40.0	30	30
13:02	40.0	15	45
13:17	40.0	15	60
13:32	34.0	15	75
13:47	25.0	15	90
14:02	19.0	15	105
14:17	10.0	15	120
14:32	7.0	15	135
14:47	3.00	15	150
15:02	1.00	15	165
15:17	0.00	15	180

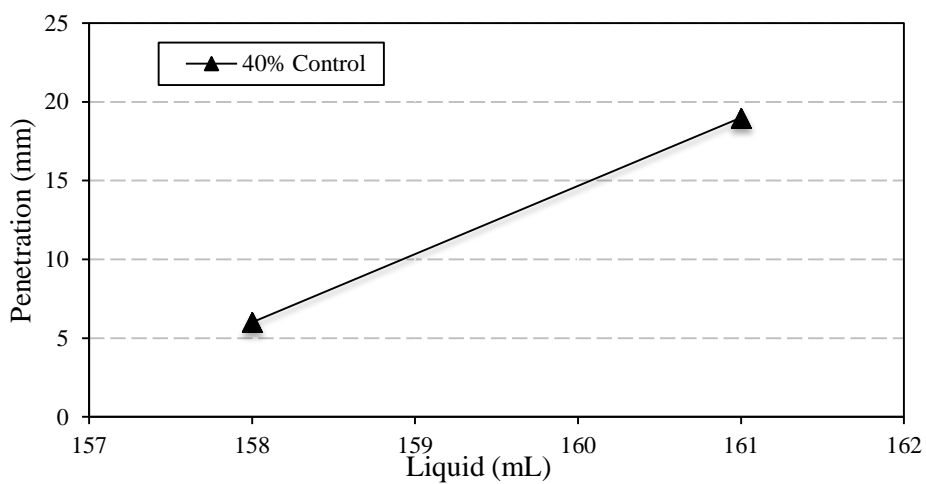


ภาพภาคผนวกที่ ข-6-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

7. สำหรับส่วนผสมควบคุม IF40

ตารางภาคผนวกที่ ข-7-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

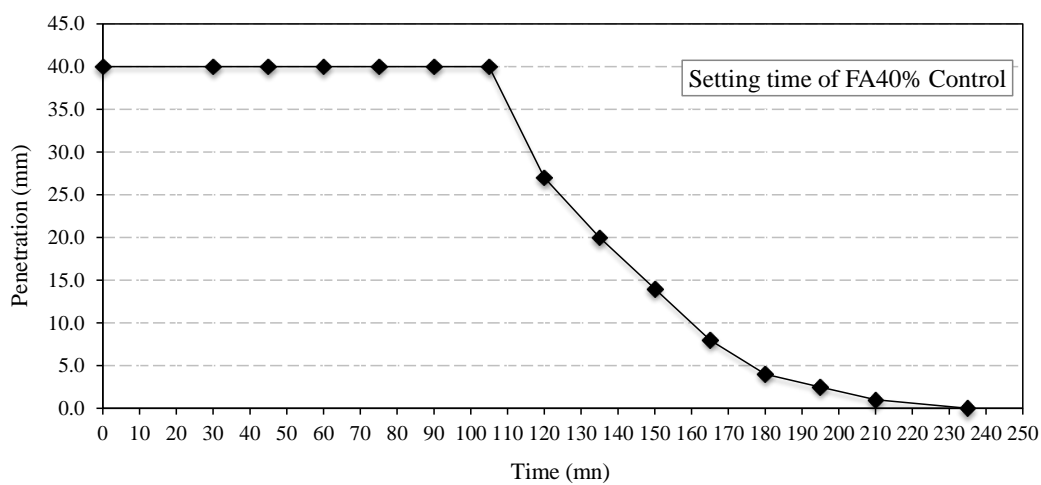
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	158	6
	161	19
สารละลาย =	159	At 10 mm
W/B =	0.245	



ภาพภาคผนวกที่ ข-7-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-7-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
12:17	40.0	0	0
12:47	40.0	30	30
13:02	40.0	15	45
13:17	40.0	15	60
13:32	40.0	15	75
13:47	40.0	15	90
14:02	40.0	15	105
14:17	27.0	15	120
14:32	20.0	15	135
14:47	14.0	15	150
15:02	8.0	15	165
15:17	4.00	15	180
15:32	2.50	15	195
15:47	1.00	15	210
16:02	0.00	15	235

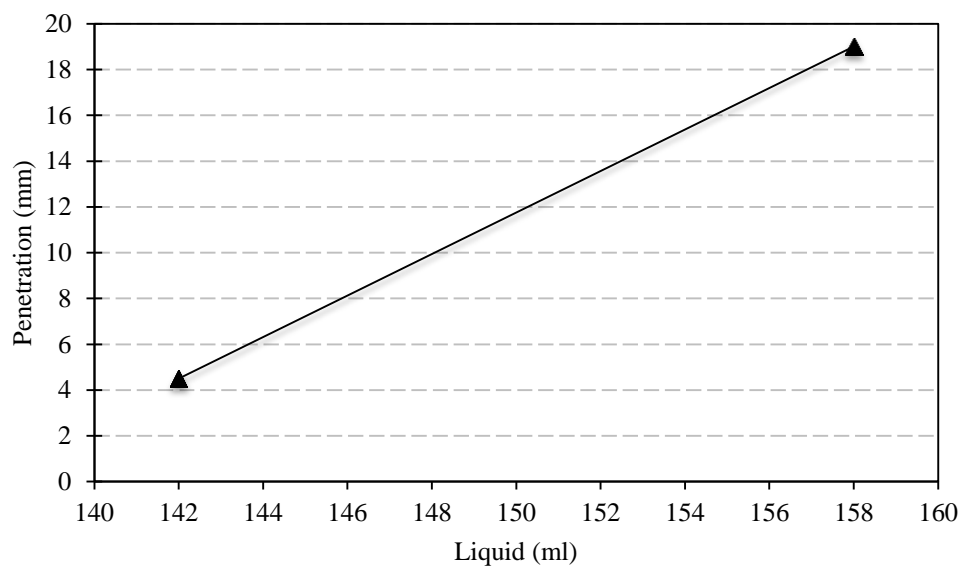


ภาพภาคผนวกที่ ข-7-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

8. สำหรับส่วนผสม IF40-0.25M

ตารางภาคผนวกที่ ข-8-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

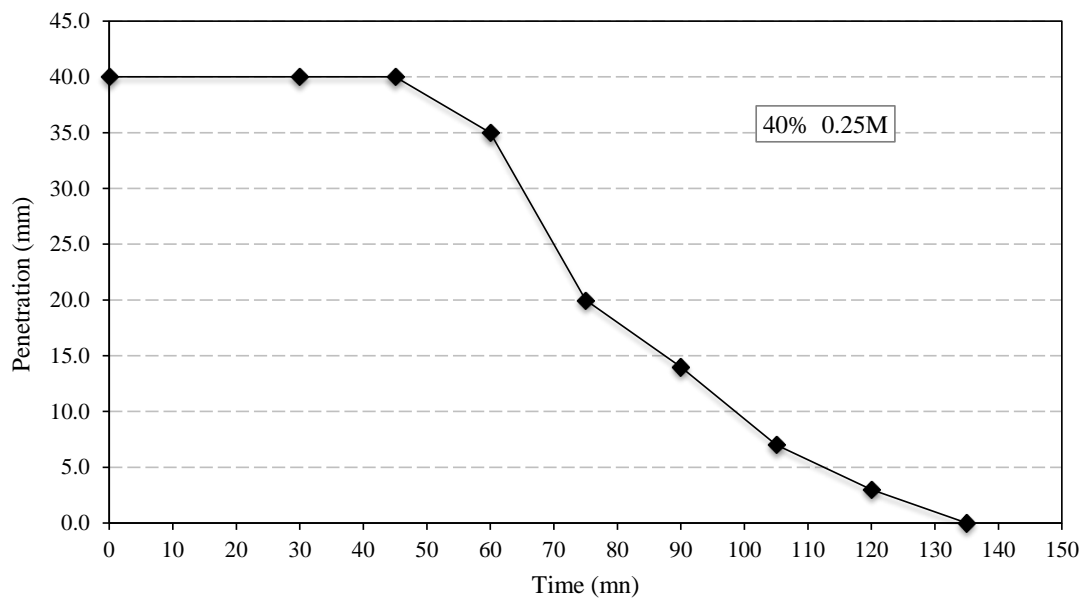
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	142	4.5
	158	19
L =	148	At 10 mm
W/B=	0.228	



ภาพภาคผนวกที่ ข-8-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-8-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
22:32	40.0	30	0
22:47	40.0	15	30
23:02	40.0	15	45
23:17	35.0	15	60
23:32	20.0	15	75
23:47	14.0	15	90
0:02	7.0	15	105
0:17	3.0	15	120
0:32	0.0	15	135

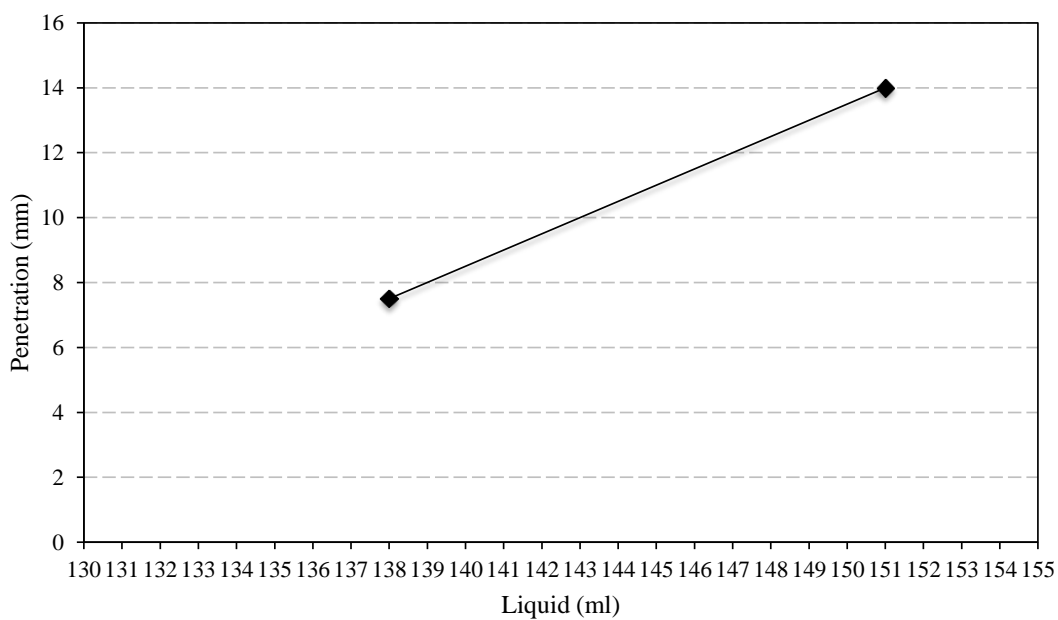


ภาพภาคผนวกที่ ข-8-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

9. สำหรับส่วนผสม IF40-0.50M

ตารางภาคผนวกที่ ข-9-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

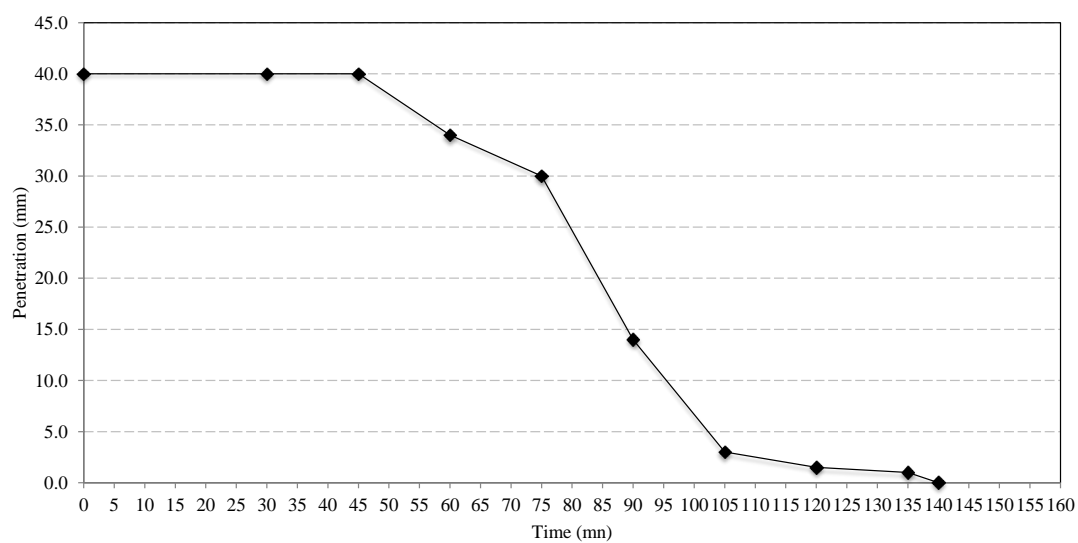
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	151	14
	138	7.5
L =	143	At 10 mm
W/B =	0.220	



ภาพภาคผนวกที่ ข-9-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-9-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
15:00	40.0	0	0
15:30	40.0	30	30
15:45	40.0	15	45
16:00	34.0	15	60
16:15	30.0	15	75
16:30	14.0	15	90
16:45	3.0	15	105
17:00	1.5	15	120
17:15	1.0	15	135
17:30	0.0	15	140

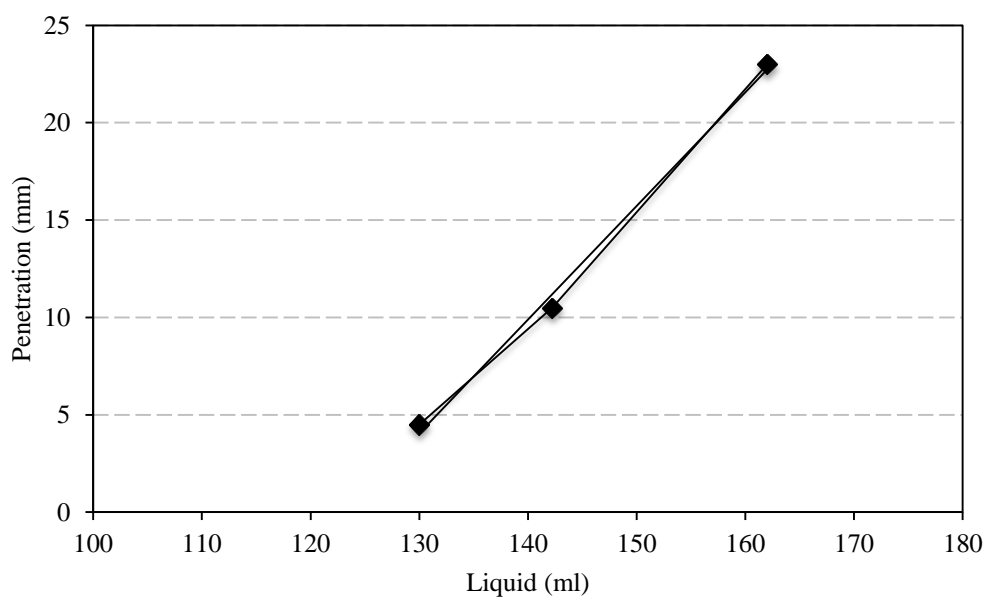


ภาพภาคผนวกที่ ข-9-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

10. สำหรับส่วนผสม IF40-0.75M

ตารางภาคผนวกที่ ข-10-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

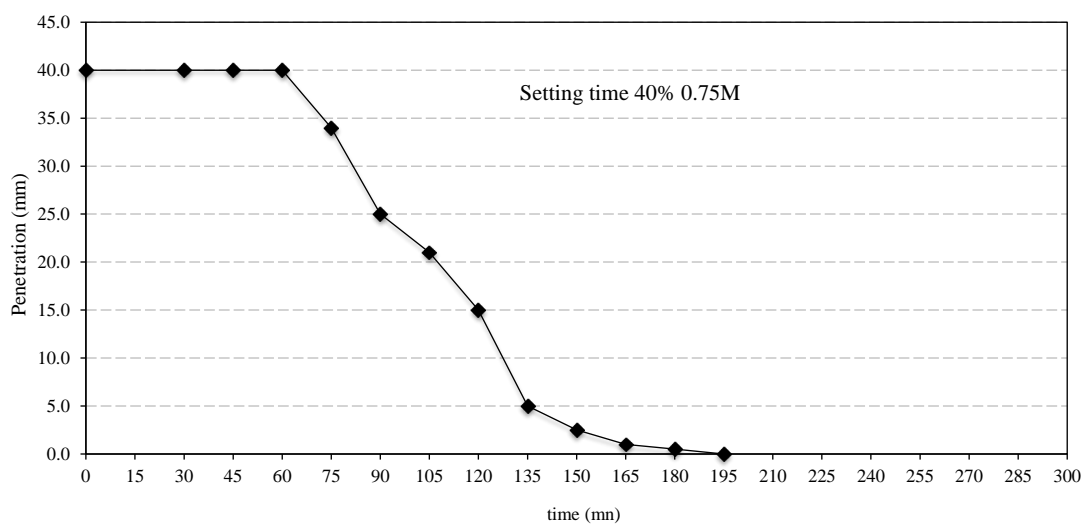
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
	130	4.5
650	142.25	10.5
	162	23
L =	140	At 10 mm
W/B =	0.215	



ภาพภาคผนวกที่ ข-10-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-10-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
19:28	40.0	0	0
19:58	40.0	30	30
20:13	40.0	15	45
20:28	40.0	15	60
20:43	34.0	15	75
20:58	25.0	15	90
21:13	21.0	15	105
21:28	15.0	15	120
21:43	5.0	15	135
21:58	2.5	15	150
22:13	1.0	15	165
22:28	0.5	15	180
22:43	0.0	15	195

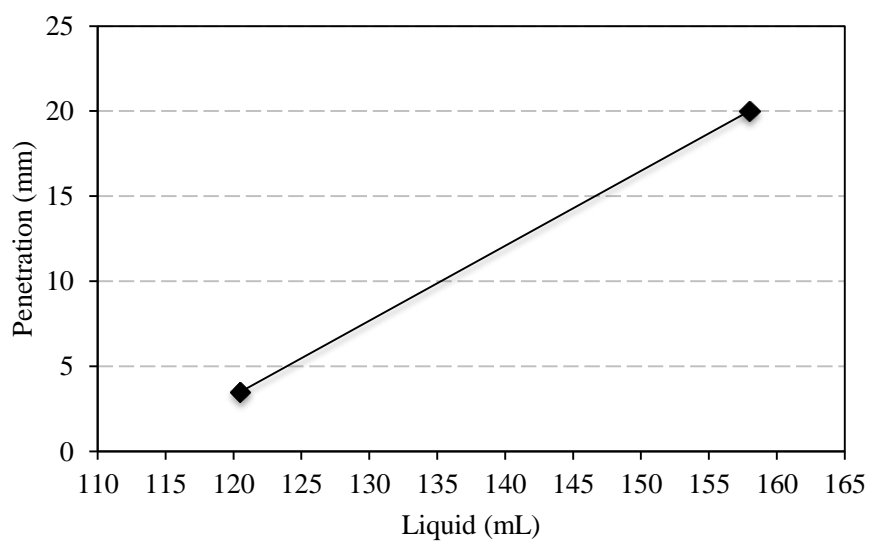


ภาพภาคผนวกที่ ข-10-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

11. สำหรับส่วนผสม IF40-1.00M

ตารางภาคผนวกที่ ข-11-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

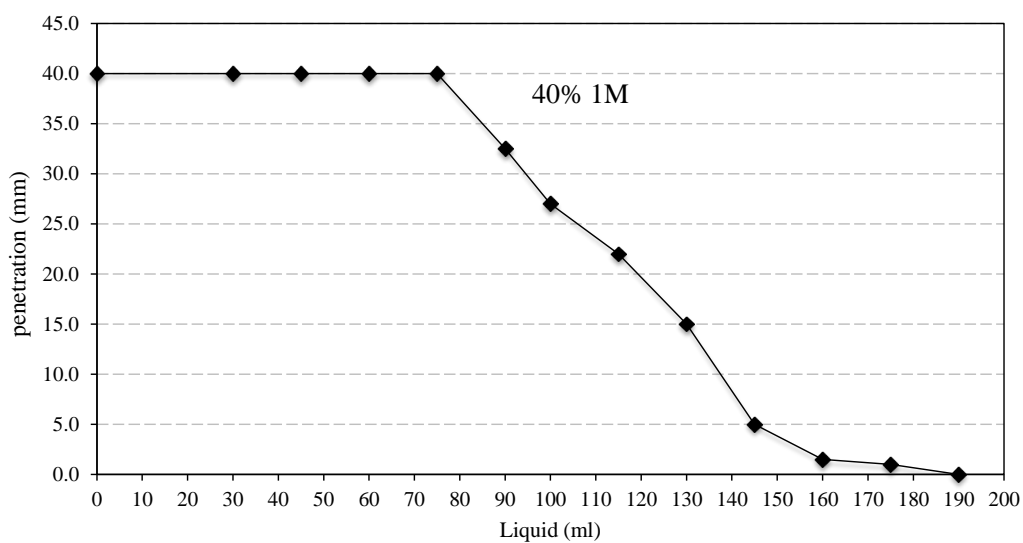
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	120.5	3.5
	158	20
L =	135	At 10 mm
W/B =	0.208	



ภาพภาคผนวกที่ ข-11-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-11-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
14:46	40.0	0	0
15:16	40.0	30	30
15:31	40.0	15	45
15:46	40.0	15	60
16:01	40.0	15	75
16:16	32.5	15	90
16:31	27.0	15	100
16:46	22.0	15	115
17:01	15.0	15	130
17:16	5.0	15	145
17:31	1.5	15	160
17:46	1.0	15	175
18:01	0.00	15	190
18:16	0.00	15	205

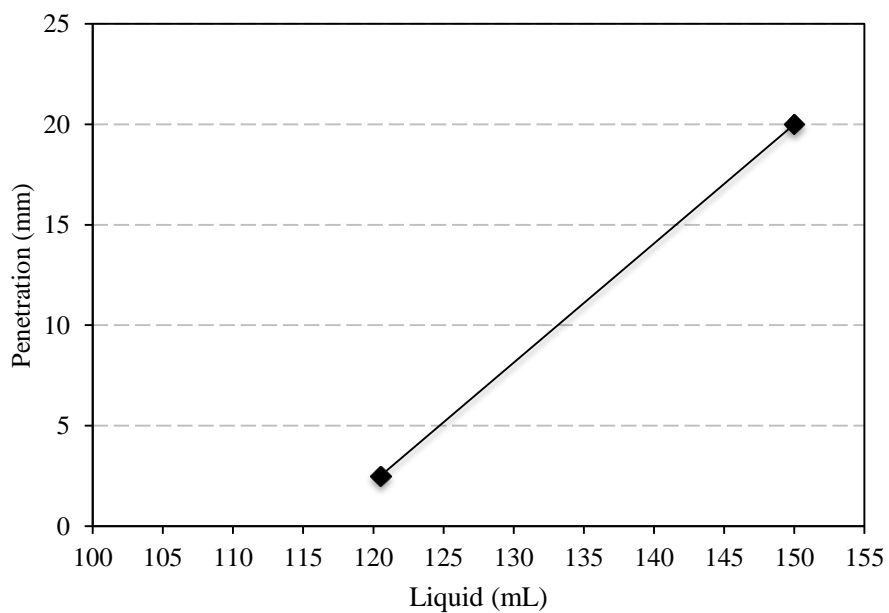


ภาพภาคผนวกที่ ข-11-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

12. สำหรับส่วนผสม IF40-1.25M

ตารางภาคผนวกที่ ข-12-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

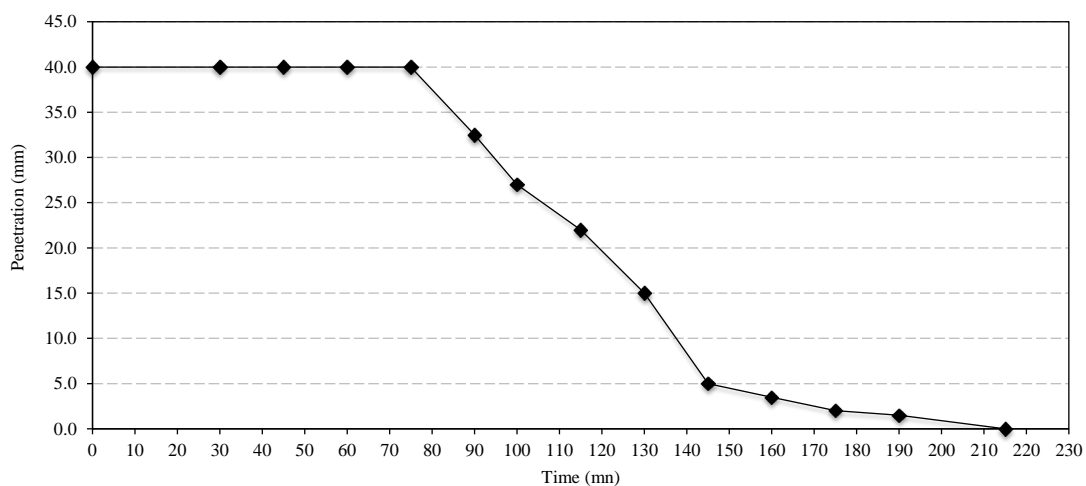
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	120.5	2.5
	150	20
L =	135	At 10 mm
W/B =	0.208	



ภาพภาคผนวกที่ ข-12-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-12-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
14:46	40.0	0	0
15:16	40.0	30	30
15:31	40.0	15	45
15:46	40.0	15	60
16:01	40.0	15	75
16:16	32.5	15	90
16:31	27.0	15	100
16:46	22.0	15	115
17:01	15.0	15	130
17:16	5.0	15	145
17:31	3.5	15	160
17:46	2.0	15	175
18:01	1.50	15	190
18:16	0.00	15	215

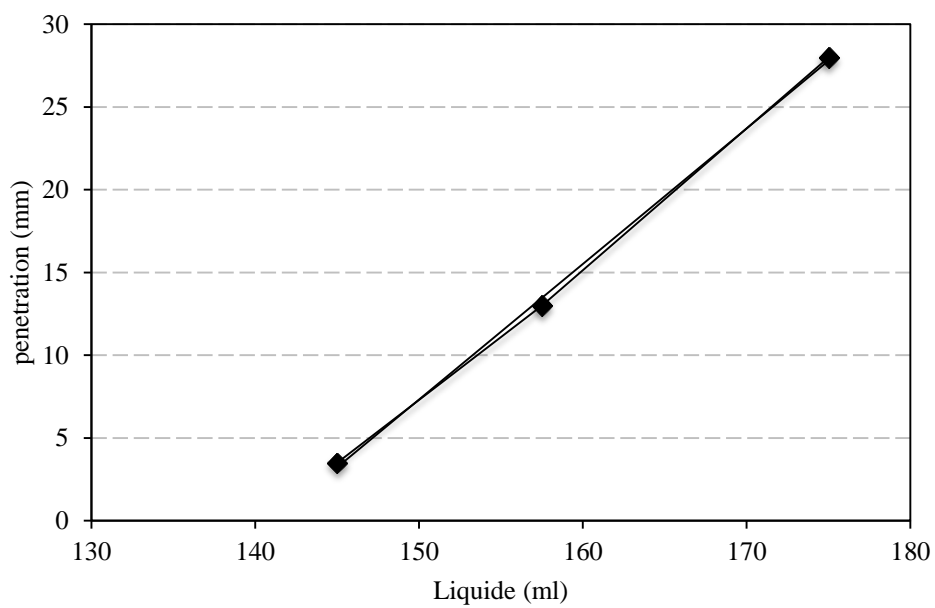


ภาพภาคผนวกที่ ข-12-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

13. สำหรับส่วนผสม IF50

ตารางภาคผนวกที่ ข-13-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

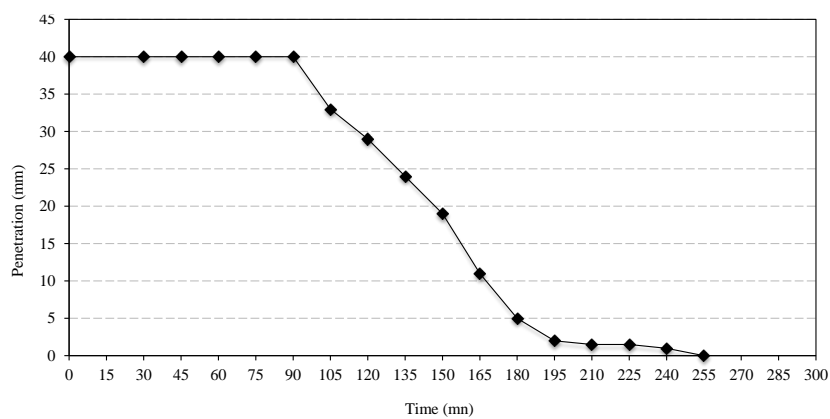
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
	145	3.5
650	157.5	13
	175	28
L =	153	
W/B =	0.236	



ภาพภาคผนวกที่ ข-13-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-13-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
18:00	40.0	0	0
18:15	40.0	30	30
18:30	40.0	15	45
18:45	40.0	15	60
19:00	40.0	15	75
19:15	40	15	90
19:30	33.0	15	105
19:45	29.0	15	120
20:00	24.0	15	135
20:15	19.0	15	150
20:30	11.0	15	165
20:45	5.0	15	180
21:00	2.00	15	195
21:15	1.50	15	210
21:30	1.50	15	225
21:45	1.00	15	240
22:00	0.00	15	255

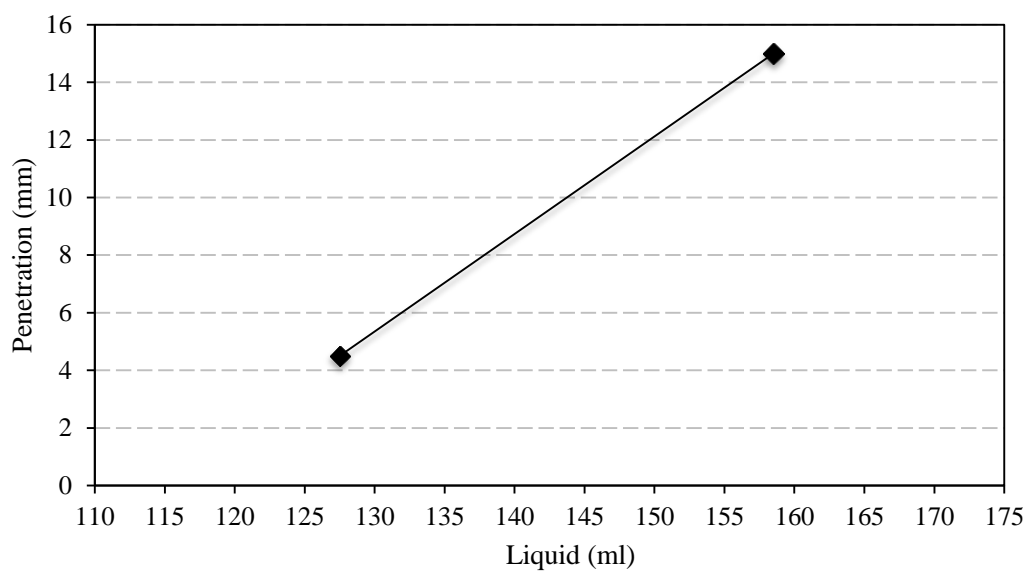


ภาพภาคผนวกที่ ข-13-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

14. สำหรับส่วนผสม IF50-0.25M

ตารางภาคผนวกที่ ข-14-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

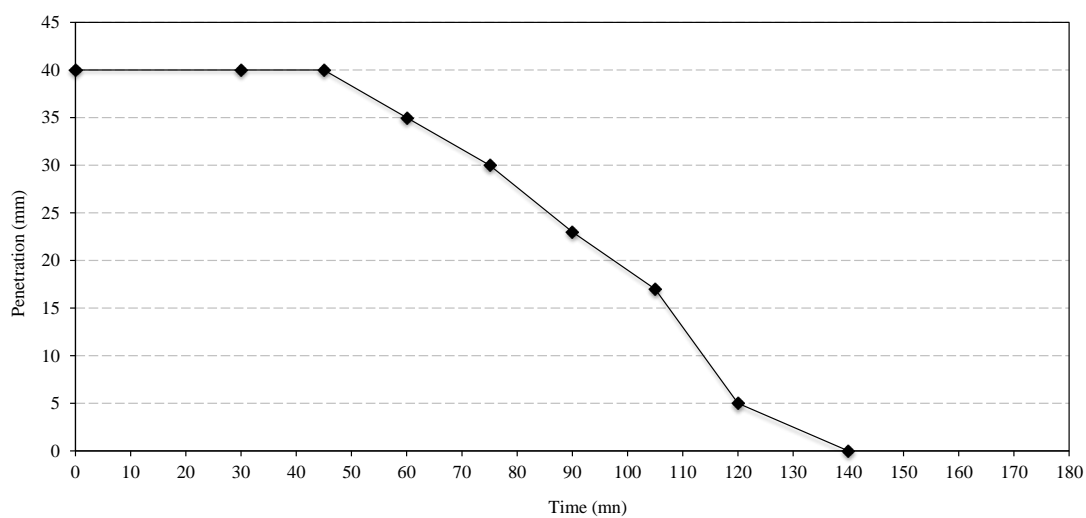
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	127.5	4.5
	158.5	15
L =	143	
W/B =	0.220	



ภาพภาคผนวกที่ ข-14-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-14-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
20:13	40.0	0	0
20:43	40.0	30	30
20:58	40.0	15	45
21:13	35.0	15	60
21:28	30.0	15	75
21:43	23.0	15	90
21:58	17.0	15	105
22:13	5.0	15	120
22:28	0.0	15	140

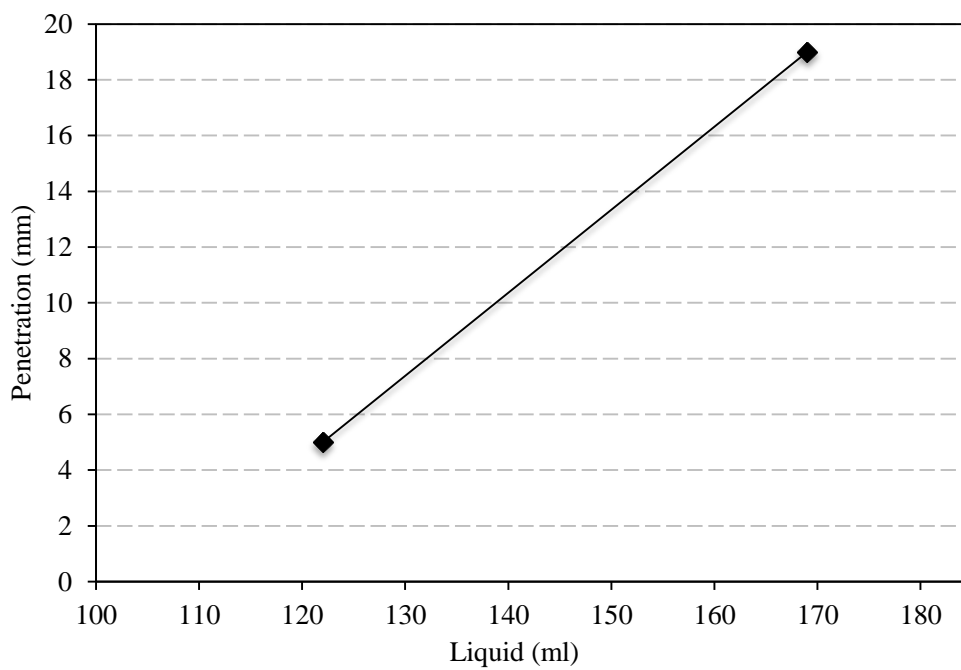


ภาพภาคผนวกที่ ข-14-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

15. สำหรับส่วนผสม IF50-0.50M

ตารางภาคผนวกที่ ข-15-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

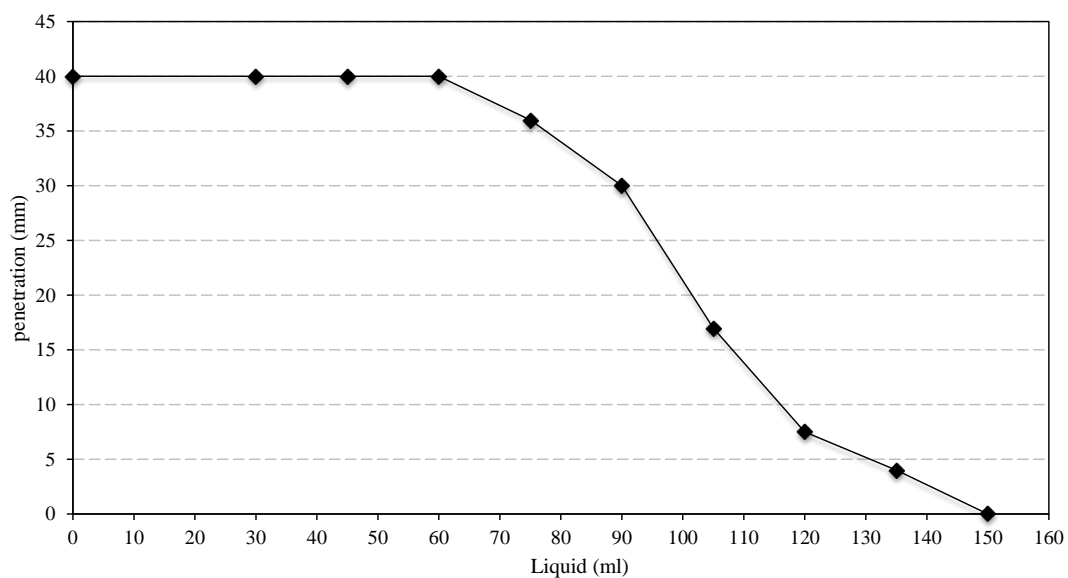
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	169	19
	122	5
L =	139	
W/B =	0.214	



ภาพภาคผนวกที่ ข-15-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-15-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
13:43	40.0	0	0
14:13	40.0	30	30
14:28	40.0	15	45
14:43	40.0	15	60
14:58	36.0	15	75
15:13	30.0	15	90
15:28	17.0	15	105
15:43	7.5	15	120
15:58	4.0	15	135
16:13	0.0	15	150

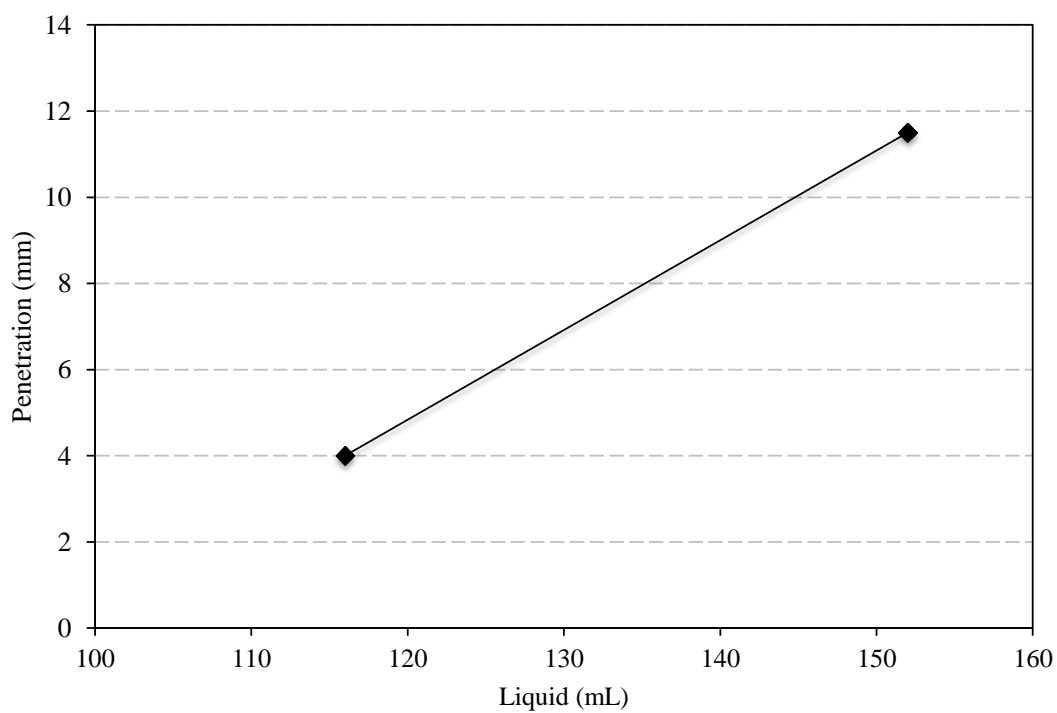


ภาพภาคผนวกที่ ข-15-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

16. สำหรับส่วนผสม IF50-0.75M

ตารางภาคผนวกที่ ข-16-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

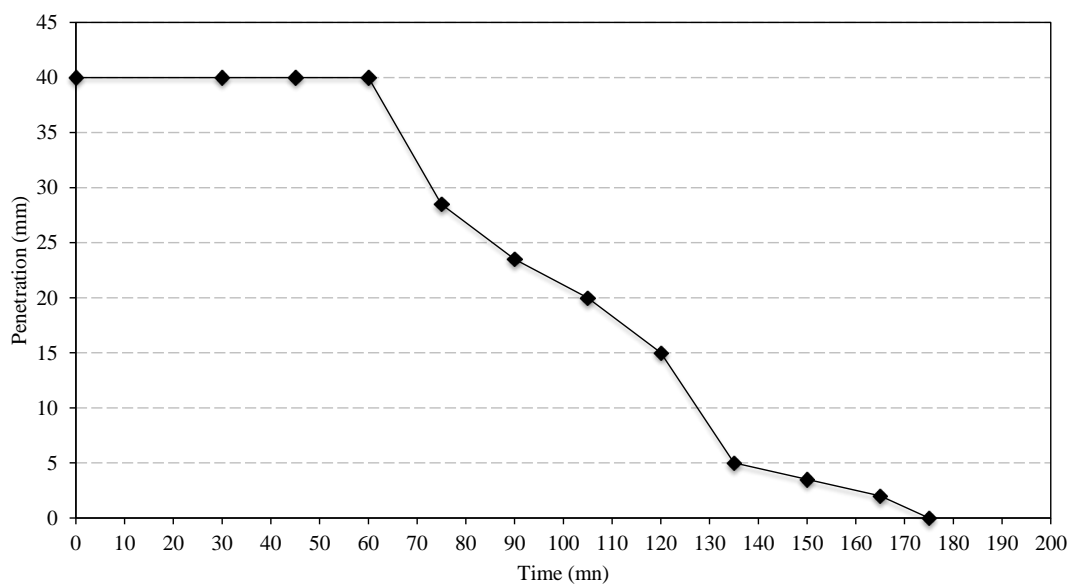
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	152	11.5
	116	4
L =	135	
W/B =	0.208	



ภาพภาคผนวกที่ ข-16-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-16-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
16:12	40.0	0	0
16:42	40.0	30	30
16:57	40.0	15	45
17:12	40.0	15	60
17:27	28.5	15	75
17:42	23.5	15	90
17:57	20.0	15	105
18:12	15.0	15	120
18:27	5.0	15	135
18:42	3.5	15	150
18:57	2.0	15	165
19:12	0	15	175

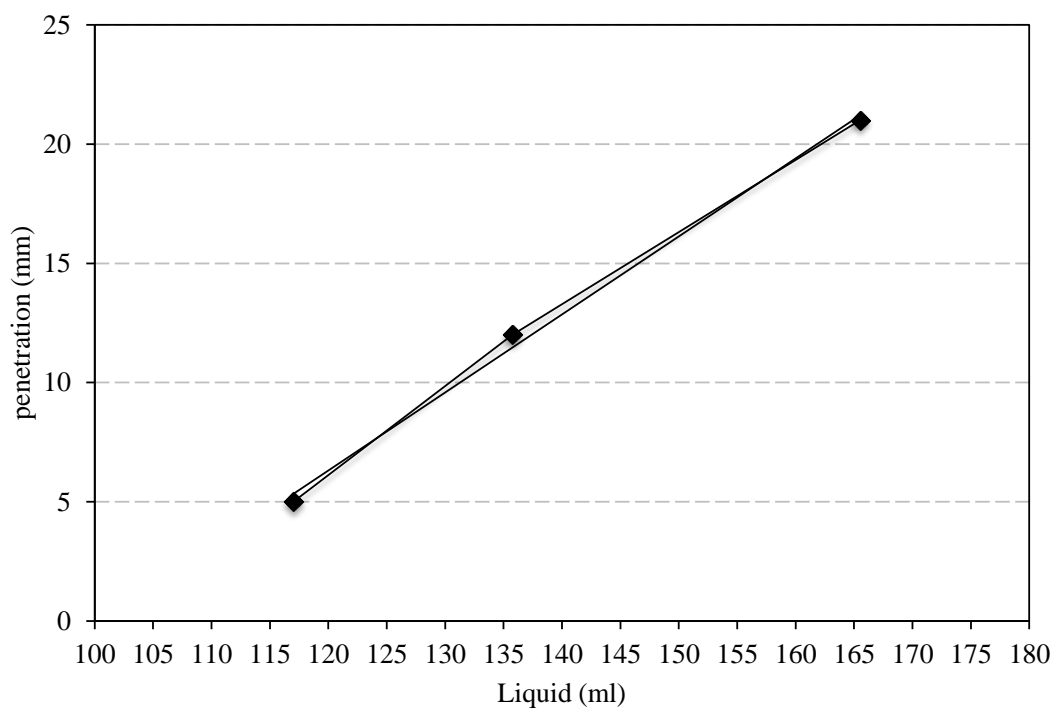


ภาพภาคผนวกที่ ข-16-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

17. สำหรับส่วนผสม IF50-1.00M

ตารางภาคผนวกที่ ข-17-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

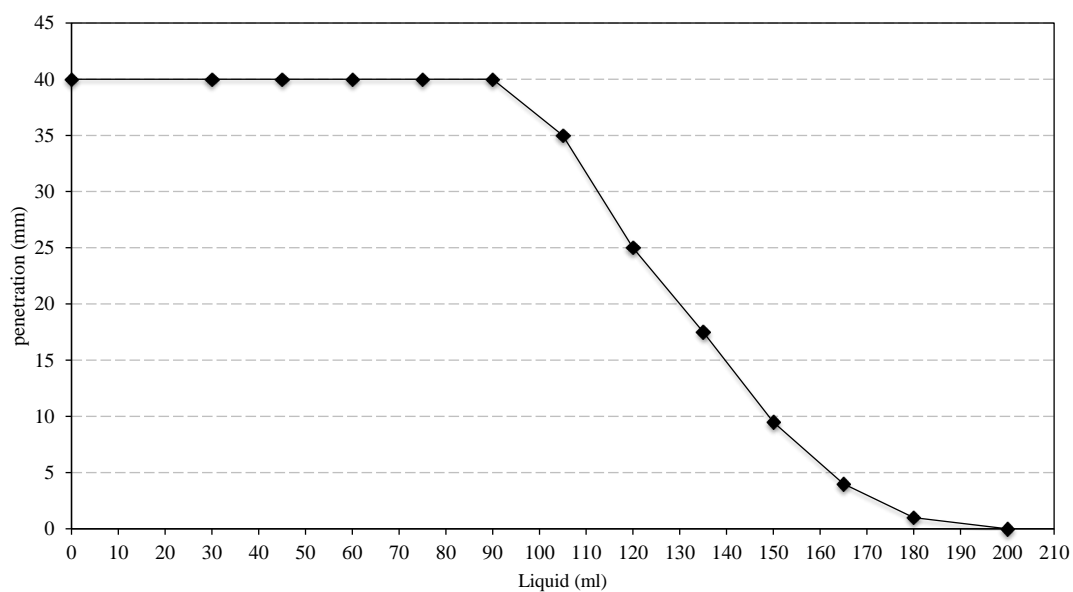
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
	117	5
650	135.75	12
	165.5	21
L =	131	
W/B =	0.2015	



ภาพภาคผนวกที่ ข-17-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-17-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
16:35	40.0	0	0
17:05	40.0	30	30
17:20	40.0	15	45
17:35	40.0	15	60
17:50	40.0	15	75
18:05	40.0	15	90
18:20	35.0	15	105
18:35	25	15	120
18:50	17.5	15	135
19:05	9.5	15	150
19:20	4.0	15	165
19:35	1.0	15	180
19:50	0.0	15	200

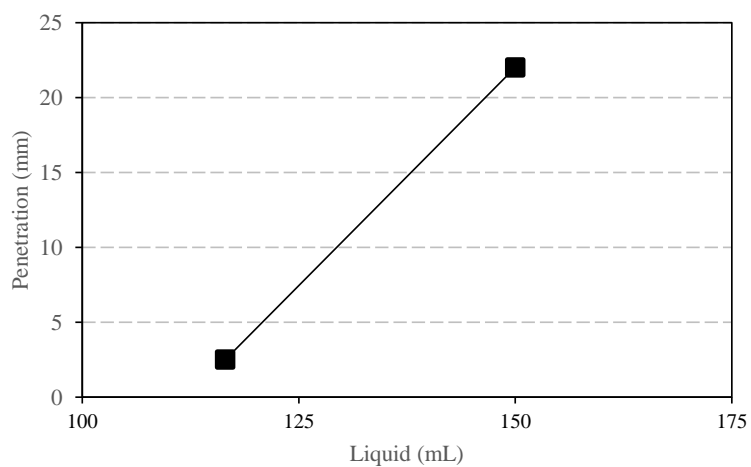


ภาพภาคผนวกที่ ข-17-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

18. สำหรับส่วนผสม IF50-1.25M

ตารางภาคผนวกที่ ข-18-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

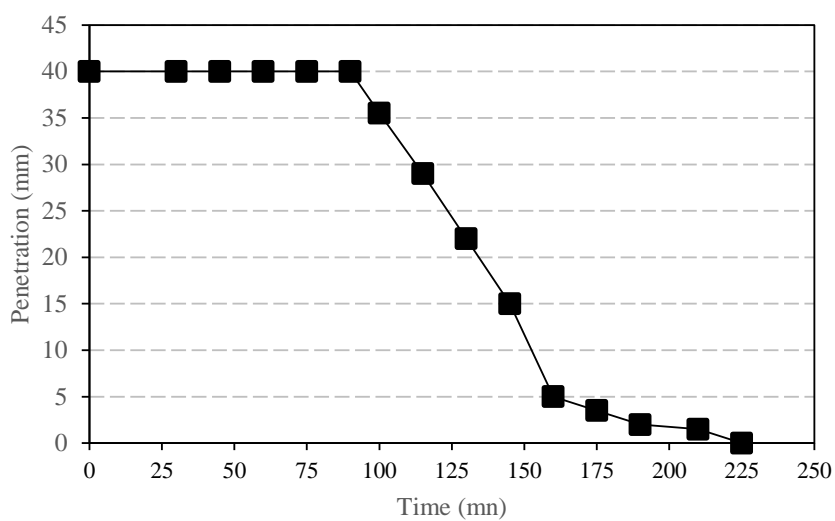
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	116.5	2.5
	150	22
L =	130	At 10 mm
W/B =	0.200	



ภาพภาคผนวกที่ ข-18-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-18-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
18:49	40	0	0
19:04	40.0	30	30
19:19	40.0	15	45
19:34	40.0	15	60
19:49	40.0	15	75
20:04	40.0	15	90
20:19	35.5	15	100
20:34	29.0	15	115
20:49	22.0	15	130
21:04	15.0	15	145
21:19	5.0	15	160
21:34	3.5	15	175
21:49	2.0	15	190
22:04	1.50	10	210
22:14	0.00	10	225

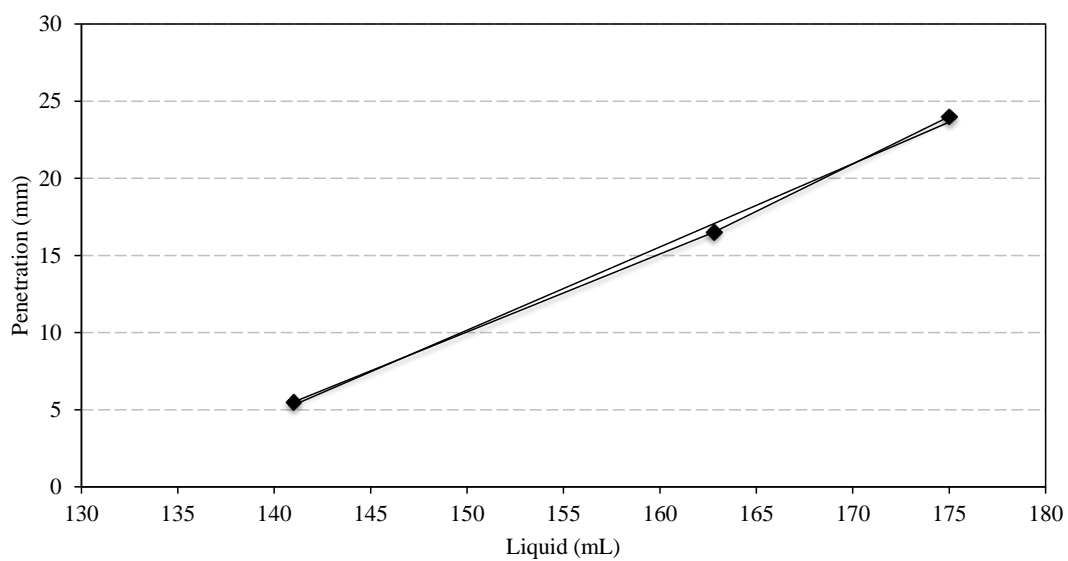


ภาพภาคผนวกที่ ข-18-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

19. สำหรับส่วนผสม IF60

ตารางภาคผนวกที่ ข-19-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

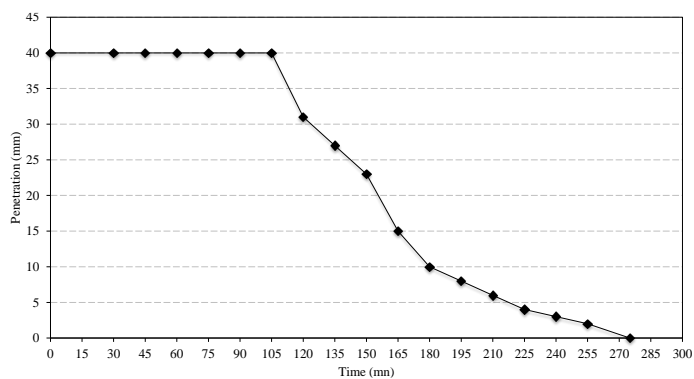
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
	141	5.5
650	162.8	16.5
	175	24
L (ml)	150	
W/B=	0.231	



ภาพภาคผนวกที่ ข-19-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-19-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
16:34	40.0	0	0
17:04	40.0	30	30
17:19	40.0	15	45
17:34	40.0	15	60
17:49	40.0	15	75
18:04	40.0	15	90
18:19	40.0	15	105
18:34	31.0	15	120
18:49	27.0	15	135
19:04	23.0	15	150
19:19	15.0	15	165
19:34	10.0	15	180
19:49	8.00	15	195
20:04	6.00	15	210
20:19	4.00	15	225
20:34	3.00	15	240
20:49	2.00	15	255
21:04	0.00	15	275

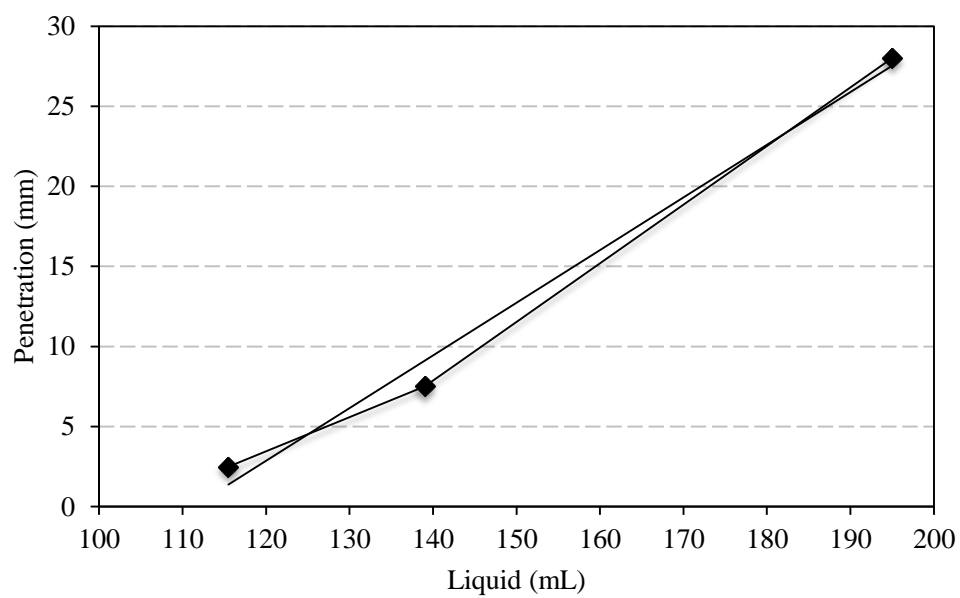


ภาพภาคผนวกที่ ข-19-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

20. สำหรับส่วนผสม IF60-0.25M

ตารางภาคผนวกที่ ข-20-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

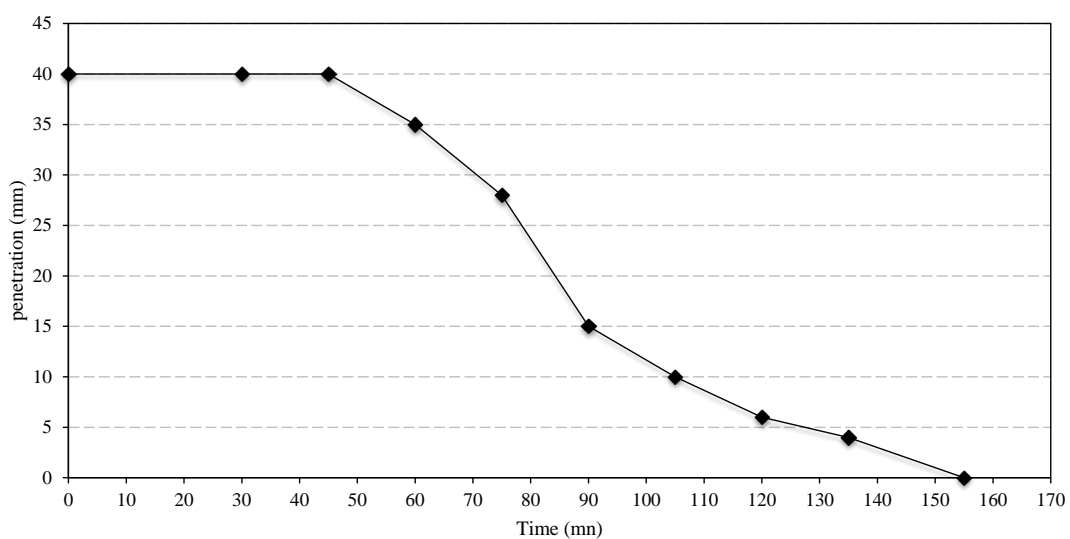
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
	115.5	2.5
650	139	7.5
	195	28
L (ml)	142	
W/B=	0.218	



ภาพภาคผนวกที่ ข-20-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-20-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
14:00	40.0	0	0
14:30	40.0	30	30
14:45	40.0	15	45
15:00	35.0	15	60
15:15	28.0	15	75
15:30	15.0	15	90
15:45	10.0	15	105
16:00	6.0	15	120
16:15	4.0	15	135
16:30	0.0	15	155

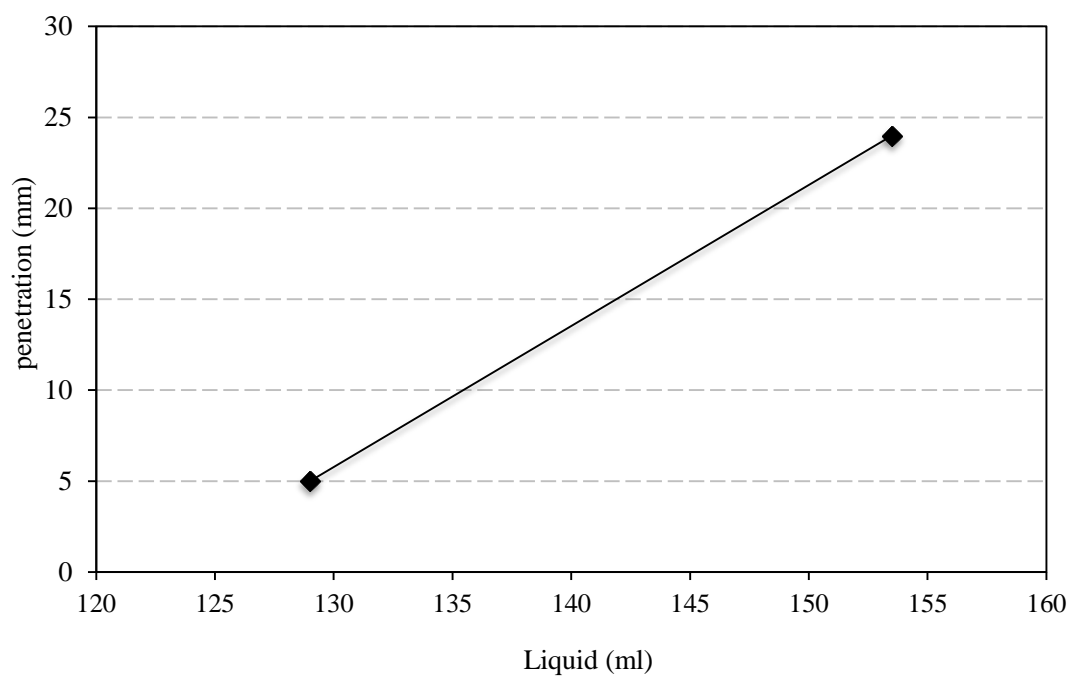


ภาพภาคผนวกที่ ข-20-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

21. สำหรับส่วนผสม IF60-0.50M

ตารางภาคผนวกที่ ข-21-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

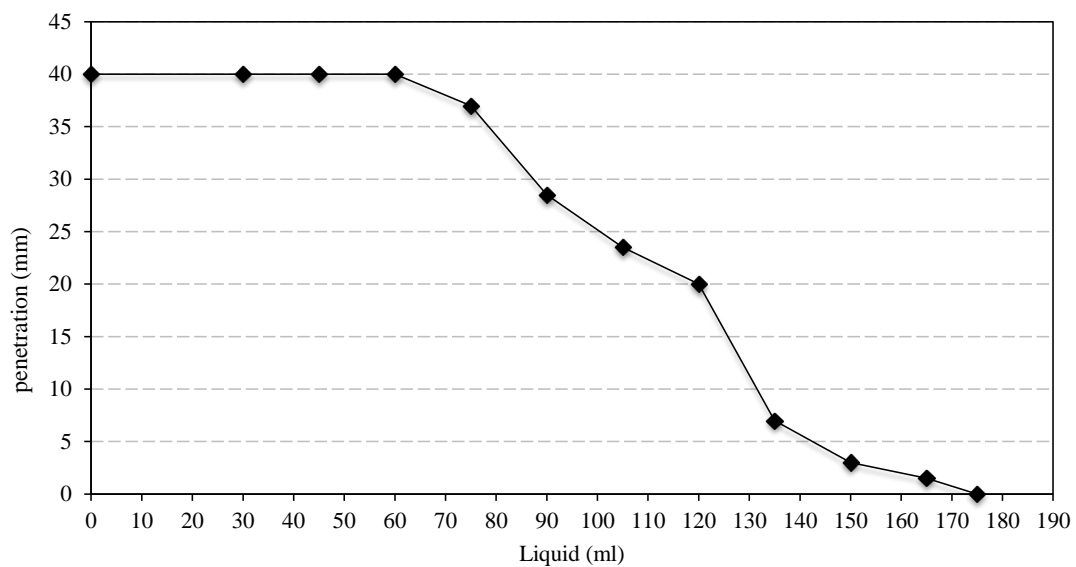
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	153.5	24
	129	5
L =	136	
W/B =	0.209	



ภาพภาคผนวกที่ ข-21-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-21-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
20:37	40.0	0	0
21:07	40.0	30	30
21:22	40.0	15	45
21:37	40.0	15	60
21:52	37.0	15	75
22:07	28.5	15	90
22:22	23.5	15	105
22:37	20.0	15	120
22:52	7.0	15	135
23:07	3.0	15	150
23:22	1.50	15	165
23:37	0.00	15	175

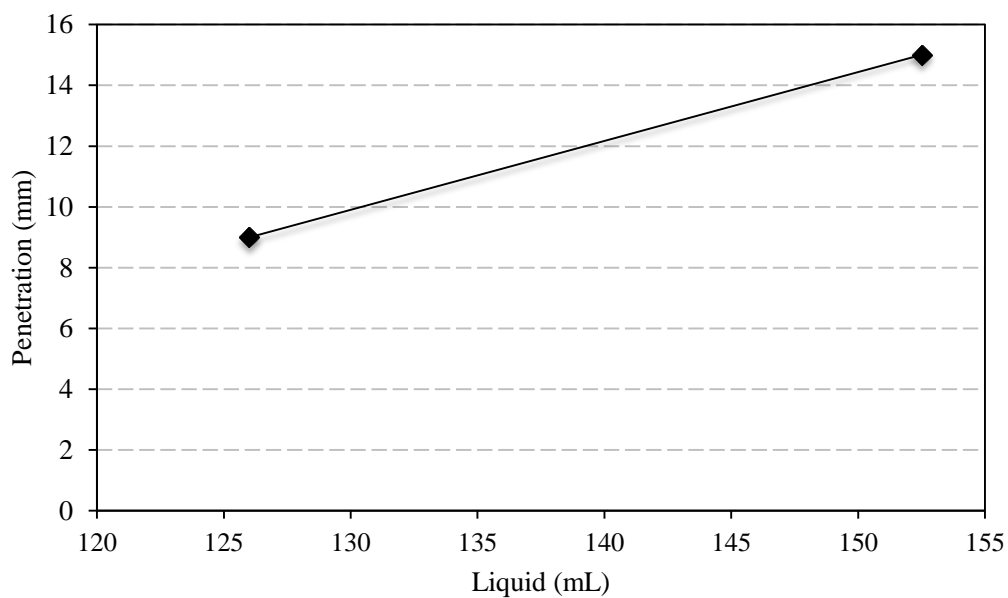


ภาพภาคผนวกที่ ข-21-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

22. สำหรับส่วนผสม IF60-0.75M

ตารางภาคผนวกที่ ข-22-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

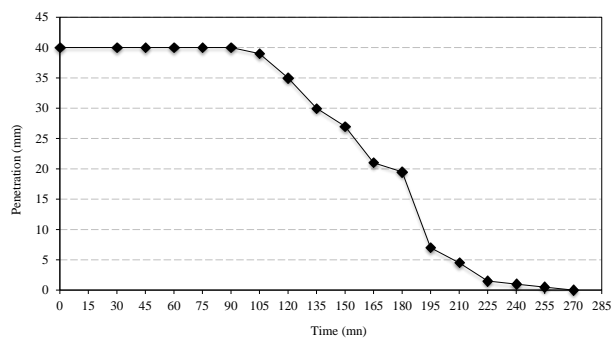
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	152.5	15
	126	9
L =	130	
W/B =	0.200	



ภาพภาคผนวกที่ ข-22-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-22-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
15:41	40.0	0	0
16:11	40.0	30	30
16:26	40.0	15	45
16:41	40.0	15	60
16:56	40.0	15	75
17:11	40.0	15	90
17:26	39.0	15	105
17:41	35.0	15	120
17:56	30.0	15	135
18:11	27.0	15	150
18:26	21.0	15	165
18:41	19.5	15	180
18:56	7.0	15	195
19:11	4.5	15	210
19:26	1.5	15	225
19:41	1.00	15	240
19:56	0.50	15	255
20:11	0.00	15	270

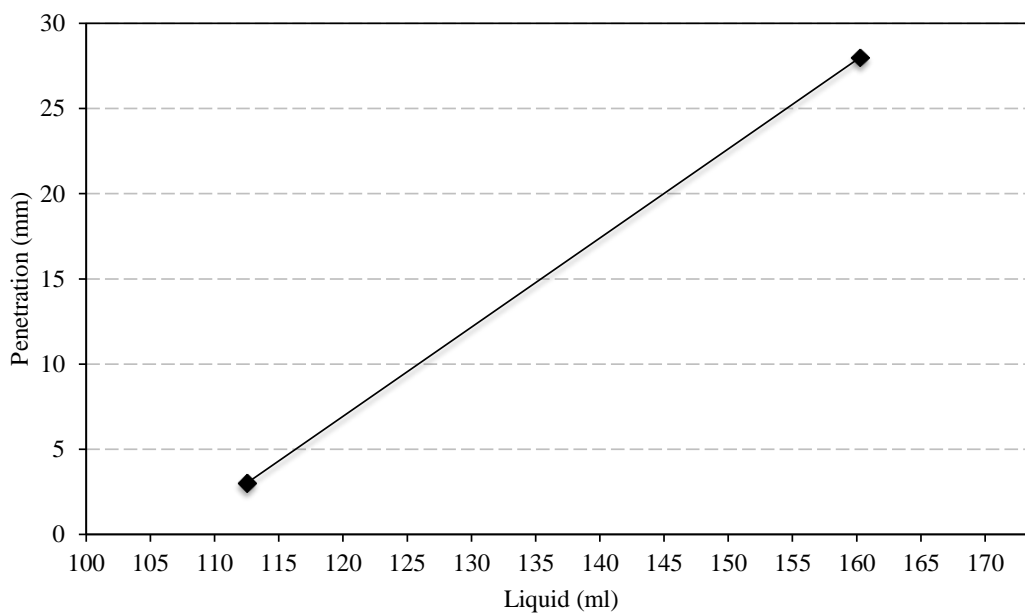


ภาพภาคผนวกที่ ข-22-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

23. สำหรับส่วนผสม IF60-1.00M

ตารางภาคผนวกที่ ข-23-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

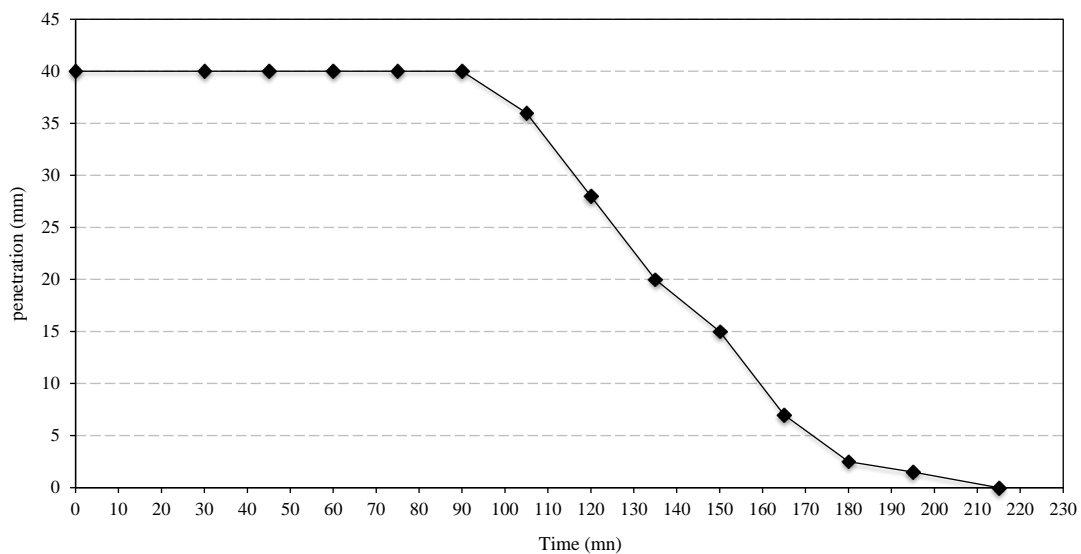
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	112.5	3
	160.25	28
L =	126	
W/B =	0.194	



ภาพภาคผนวกที่ ข-23-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-23-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
22:10	40.0	0	0
22:40	40.0	30	30
22:55	40.0	15	45
23:10	40.0	15	60
23:25	40.0	15	75
23:40	40.0	15	90
23:55	36.0	15	105
0:10	28.0	15	120
0:25	20.0	15	135
0:40	15.0	15	150
0:55	7.00	15	165
1:10	2.50	15	180
1:25	1.50	15	195
1:40	0.00	15	215

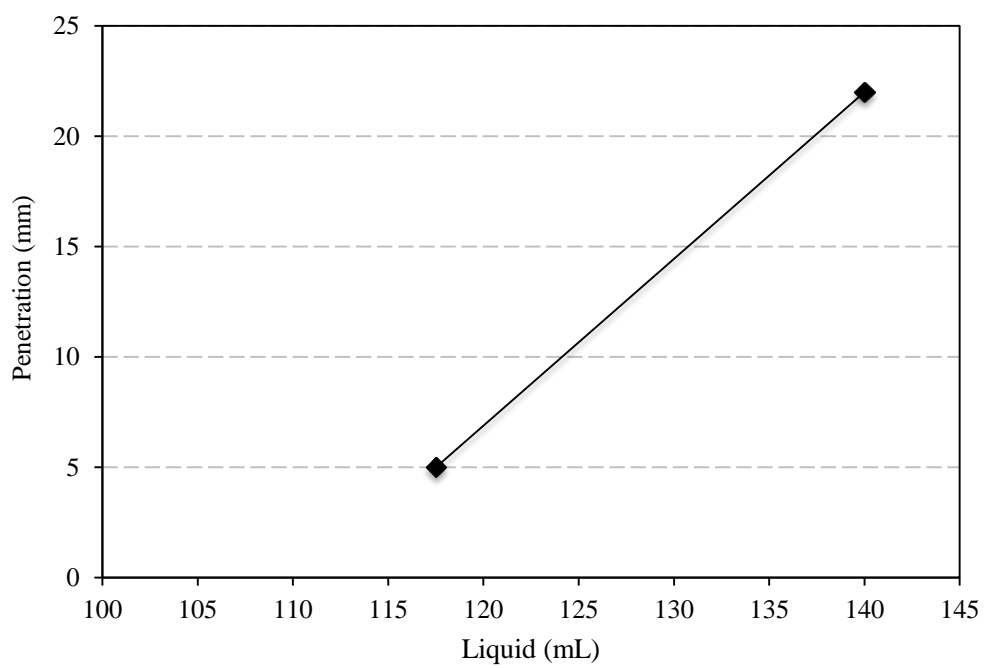


ภาพภาคผนวกที่ ข-23-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

24. สำหรับส่วนผสม IF60-1.00M

ตารางภาคผนวกที่ ข-24-1 การหาความชื้นหลงปกติโดยเครื่องมือ Vicat

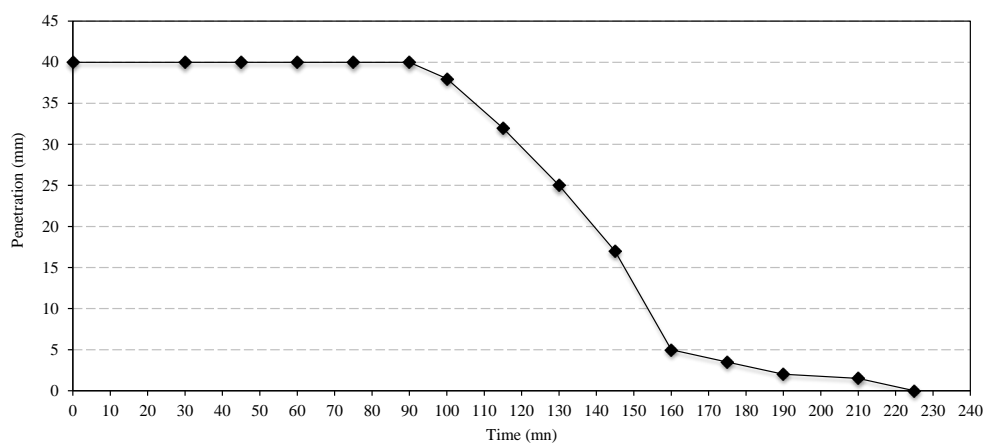
Binder (g)	Liquid (ml)	Penetration (mm)
650	117.5	5
	140	22
L =	130	At 10 mm
W/B =	0.200	



ภาพภาคผนวกที่ ข-24-1 การหาความชื้นหลงปกติ

ตารางภาคผนวกที่ ข-24-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

Time	Penetration (mm)	During time (mn)	Com. Time
18:49	40	0	0
19:04	40	30	30
19:19	40.0	15	45
19:34	40.0	15	60
19:49	40.0	15	75
20:04	40.0	15	90
20:19	40.0	15	100
20:34	38.0	15	115
20:49	32.0	15	130
21:04	25.0	15	145
21:19	17.0	15	160
21:34	5.0	15	175
21:49	3.5	15	190
22:04	2.0	10	210
22:14	1.50	10	225
22:28	0.00	10	240



ภาพภาคผนวกที่ ข-24-2 การหาการก่อดัวของเพสต์

ภาคผนวก ค
คุณสมบัติของมอรัตารัสต

1. เถ้าถ่านหิน 30%

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์สด

Binder =	300	g	Binder:	Sand:	NaOH
Cement =	210	g	1.00	2.75	Flow (%)
Fly ash =	90	g			
Sand =	825	g			
<hr/>					
1. ส่วนผสมควบคุม			$L_1 =$	190	ml
$D_1 =$	20.5	cm	$L_2 =$	186	ml
$D_2 =$	20.5	cm	$L_{use} =$	188	ml
$D_3 =$	21	cm	W/B=	0.627	
$D_4 =$	21.5	cm			
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	108.75	%			
<hr/>					
2. 0.25M NaOH			$L_1 =$	179	ml
$D_1 =$	20.5	cm	$L_2 =$	176	ml
$D_2 =$	20	cm	$L_3 =$	175	ml
$D_3 =$	20.5	cm	$L_{use} =$	178	ml
$D_4 =$	21.5	cm	W/B=	0.593	
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	106.25	%			

3. 0.50M NaOH			$L_1 =$	175	ml
$D_1 =$	21	cm	W/B=	0.583	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	108.75	%			
4. 0.75M NaOH			$L_0 =$	174	ml
$D_1 =$	20.5	cm	$L_1 =$	178	ml
$D_2 =$	20.5	cm	$L_2 =$	172	ml
$D_3 =$	21	cm	$L_{use} =$	176	ml
$D_4 =$	21	cm	W/B=	0.587	
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	107.5	%			
5. 1.00M NaOH			$L_0 =$	182	ml
$D_1 =$	20.5	cm	$L_1 =$	178	ml
$D_2 =$	20.5	cm	$L_{use} =$	180	ml
$D_3 =$	21	cm	W/B=	0.600	
$D_4 =$	20.7	cm			
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	106.75	%			

6. 1.25M NaOH			$L_0 =$	186	ml
$D_1 =$	21.5	cm	$L_1 =$	182	ml
$D_2 =$	21.5	cm	$L_{use} =$	184	ml
$D_3 =$	21	cm	W/B=	0.613	
$D_4 =$	20.5	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	111.25	%			

2. เถ้าถ่านหิน 40%

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์สด

Binder =	300	g	Binder:	Sand:	NaOH
Cement =	180	g	1.00	2.75	Flow (%)
Fly ash =	120	g			
Sand =	825	g			

1. Control

$D_1 =$	21	cm	$L_1 =$	186	ml
$D_2 =$	21	cm	W/B=	0.620	
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	110	%			

2. 0.25M NaOH			$L_1 =$	175	ml
$D_1 =$	20.5	cm	$W/B =$	0.583	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	20.3	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	105.75	%			
3. 0.50M NaOH			$L_1 =$	173	ml
$D_1 =$	20.2	cm	$W/B =$	0.577	
$D_2 =$	21	cm			
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	20.5	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	106.75	%			
4. 0.75M NaOH			$L_1 =$	174	ml
$D_1 =$	21	cm	$W/B =$	0.580	
$D_2 =$	21	cm			
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	110	%			

5. 1.00M NaOH			$L_1 =$	177	ml
$D_1 =$	20	cm	W/B =	0.590	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	21.5	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	107.5	%			

6. 1.25M NaOH			$L_1 =$	181	ml
$D_1 =$	20.5	cm	W/B =	0.603	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	107.5	%			

3. เถ้าถ่านหิน 50%

ตารางภาคผนวกที่ ค-3 การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์สด

Binder =	300	g	Binder:	Sand:	NaOH
Cement =	150	g	1.00	2.75	Flow (%)
Fly ash =	150	g			
Sand =	825	g			

1. ส่วนผสมควบคุม			$L_1 =$	182	ml
$D_1 =$	20.5	cm	$L_{use} =$	184	ml
$D_2 =$	21	cm	W/B=	0.613	
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	108.75	%			
2. 0.25M NaOH			$L_1 =$	174	ml
$D_1 =$	20.5	cm	W/B=	0.580	
$D_2 =$	20.8	cm			
$D_3 =$	20.8	cm			
$D_4 =$	20.8	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	107.25	%			
3. 0.50M NaOH			$L_1 =$	170	ml
$D_1 =$	20.5	cm	W/B=	0.567	
$D_2 =$	21	cm			
$D_3 =$	20.2	cm			
$D_4 =$	20.5	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	105.5	%			

4. 0.75M NaOH			$L_1 =$	172	ml
$D_1 =$	20.5	cm	W/B=	0.573	
$D_2 =$	20.8	cm			
$D_3 =$	21.5	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	109.5	%			
5. 1.0M NaOH			$L_1 =$	175	ml
$D_1 =$	20.5	cm	W/B=	0.583	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	21.5	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	108.75	%			
6. 1.25M NaOH			$L_1 =$	179	ml
$D_1 =$	21	cm	W/B=	0.597	
$D_2 =$	21	cm			
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	110	%			

4. เถ้าถ่านหิน 60%

ตารางภาคผนวกที่ ค-4 การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์สด

Binder =	300	g	Binder:	Sand:	NaOH
Cement =	120	g	1.00	2.75	Flow (%)
Fly ash =	180	g			
Sand =	825	g			
<hr/>					
1. ส่วนผสมควบคุม			$L_1 =$	182	ml
$D_1 =$	21	cm	W/B =	0.607	
$D_2 =$	21	cm			
$D_3 =$	20.8	cm			
$D_4 =$	20.7	cm			
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	108.75	%			
<hr/>					
2. 0.25M NaOH			$L_1 =$	171	ml
$D_1 =$	21	cm	W/B =	0.570	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	21	cm			
$D_4 =$	20.5	cm			
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	108.33	%			
<hr/>					
3. 0.50M NaOH			$L_1 =$	167	ml
$D_1 =$	20.5	cm	W/B =	0.557	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	20.5	cm			
$D_4 =$	20.6	cm			
$D_o =$	10	cm			
Flow (%) =	105.25	%			

5. 1.0M NaOH			$L_1 =$	169	ml
$D_1 =$	21	cm	$W/B =$	0.563	
$D_2 =$	21.2	cm			
$D_3 =$	20.5	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	109.25	%			
6. 1.25M NaOH			$L_1 =$	173	ml
$D_1 =$	21.2	cm	$W/B =$	0.577	
$D_2 =$	20.5	cm			
$D_3 =$	21.5	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	110.5	%			
4. 0.75M NaOH			$L_1 =$	177	ml
$D_1 =$	21	cm	$W/B =$	0.590	
$D_2 =$	20.7	cm			
$D_3 =$	20.5	cm			
$D_4 =$	21	cm			
$D_0 =$	10	cm			
Flow (%) =	108	%			

ภาคผนวก ง
กำลังอัดของมอร์ตาร์

เริ่มวันที่ 29/10/2015 เสร็จวันที่ 31/12/2015 ของการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

1. อายุมอร์ตาร์ที่ 3 วัน

ตารางภาคผนวกที่ ง-1 กำลังอัดที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสมควบคุม (Control)

IF 30	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	32.10	25.00	130.89	
2	31.30	25.00	127.62	129.26
3	24.40	25.00	99.49	
IF 40				
1	25.00	25.00	101.94	
2	27.10	25.00	110.50	107.65
3	27.10	25.00	110.50	
IF 50				
1	21.10	25.00	86.03	
2	20.40	25.00	83.18	84.00
3	20.30	25.00	82.77	
IF 60				
1	17.00	25.00	69.32	
2	18.80	25.00	76.66	74.35
3	18.90	25.00	77.06	

ตารางภาคผนวกที่ ง-2 กำลังอัดที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF30-NaOH

IF 30 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	31.60	25.00	128.85	
2	30.80	25.00	125.59	124.77
3	29.40	25.00	119.88	
IF 30 - 0.50M				
1	40.60	25.00	165.55	
2	41.70	25.00	170.03	167.04
3	40.60	25.00	165.55	
IF 30 - 0.75M				
1	30.80	25.00	125.59	
2	32.30	25.00	131.70	128.85
3	31.70	25.00	129.26	
IF 30 - 1.00M				
1	27.10	25.00	110.50	
2	26.40	25.00	107.65	110.09
3	27.50	25.00	112.13	
IF 30 - 1.25M				
1	20.70	25.00	84.40	
2	20.20	25.00	82.36	80.73
3	18.50	25.00	75.43	

ตารางภาคผนวกที่ ง-3 กำลังอัดที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF40-NaOH

IF 40 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	16.70	25.00	68.09	
2	25.90	25.00	105.61	106.63
3	26.40	25.00	107.65	
IF 40 - 0.50M				
1	23.70	25.00	96.64	
2	30.50	25.00	124.36	124.97
3	30.80	25.00	125.59	
IF 40 - 0.75M				
1	26.80	25.00	109.28	
2	25.50	25.00	103.98	106.97
3	26.40	25.00	107.65	
IF 40 - 1.00M				
1	25.40	25.00	103.57	
2	25.60	25.00	104.38	104.25
3	25.70	25.00	104.79	
IF 40 - 1.25M				
1	16.80	25.00	68.50	
2	16.30	25.00	66.46	67.48
3	12.40	25.00	50.56	

ตารางภาคผนวกที่ ง-4 กำลังอัดที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF50-NaOH

IF 50 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	22.00	25.00	89.70	
2	15.90	25.00	64.83	86.24
3	20.30	25.00	82.77	
IF 50 - 0.50M				
1	34.70	25.00	141.49	
2	32.90	25.00	134.15	137.68
3	33.70	25.00	137.41	
IF 50 - 0.75M				
1	22.20	25.00	90.52	
2	22.50	25.00	91.74	92.01
3	23.00	25.00	93.78	
IF 50 - 1.00M				
1	22.80	25.00	92.97	
2	23.40	25.00	95.41	93.51
3	22.60	25.00	92.15	
IF 50 - 1.25M				
1	17.80	25.00	72.58	
2	18.00	25.00	73.39	73.67
3	18.40	25.00	75.03	

ตารางภาคผนวกที่ ง-5 กำลังอัดที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF60-NaOH

IF 60 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	19.30	25.00	78.70	
2	20.00	25.00	81.55	78.29
3	19.10	25.00	77.88	
IF 60 - 0.50M				
1	23.70	25.00	96.64	
2	22.50	25.00	91.74	94.19
3	23.10	25.00	94.19	
IF 60 - 0.75M				
1	19.80	25.00	80.73	
2	20.00	25.00	81.55	81.28
3	20.00	25.00	81.55	
IF 60 - 1.00M				
1	16.50	25.00	67.28	
2	15.10	25.00	61.57	64.42
3	15.80	25.00	64.42	
IF 60 - 1.25M				
1	12.10	25.00	49.34	
2	14.80	25.00	60.35	56.68
3	14.80	25.00	60.35	

2. อายุมอร์ตาร์ที่ 7 วัน

ตารางภาคผนวกที่ ง-7 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสมควบคุม (Control)

IF 30	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	34.70	25.00	141.49	
2	36.70	25.00	149.64	145.84
3	35.90	25.00	146.38	
IF 40				
1	26.20	25.00	106.83	
2	26.60	25.00	108.46	109.28
3	27.60	25.00	112.54	
IF 50				
1	25.60	25.00	104.38	
2	25.20	25.00	102.75	102.07
3	24.30	25.00	99.08	
IF 60				
1	20.30	25.00	82.77	
2	19.30	25.00	78.70	83.45
3	21.80	25.00	88.89	

ตารางภาคผนวกที่ ง-8 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF30-NaOH

IF 30 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	32.90	25.00	134.15	
2	33.90	25.00	138.23	136.19
3	28.80	25.00	117.43	
IF 30 - 0.50M				
1	45.20	25.00	184.30	
2	43.60	25.00	177.78	181.86
3	45.00	25.00	183.49	
IF 30 - 0.75M				
1	28.70	25.00	117.02	
2	36.90	25.00	150.46	151.07
3	37.20	25.00	151.68	
IF 30 - 1.00M				
1	32.70	25.00	133.33	
2	29.40	25.00	119.88	120.97
3	26.90	25.00	109.68	
IF 30 - 1.25M				
1	19.70	25.00	80.33	
2	18.60	25.00	75.84	83.45
3	23.10	25.00	94.19	

ตารางภาคผนวกที่ ง-9 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF40-NaOH

IF 40 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	23.30	25.00	95.01	
2	30.30	25.00	123.55	122.94
3	30.00	25.00	122.32	
IF 40 - 0.50M				
1	37.20	25.00	151.68	
2	38.20	25.00	155.76	152.09
3	36.50	25.00	148.83	
IF 40 - 0.75M				
1	30.20	25.00	123.14	
2	32.40	25.00	132.11	128.03
3	31.60	25.00	128.85	
IF 40 - 1.00M				
1	30.60	25.00	124.77	
2	31.10	25.00	126.81	125.72
3	30.80	25.00	125.59	
IF 40 - 1.25M				
1	23.90	25.00	97.45	
2	22.20	25.00	90.52	93.99
3	23.20	25.00	94.60	

ตารางภาคผนวกที่ ง-9 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF50-NaOH

IF 50 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	26.00	25.00	106.01	
2	27.30	25.00	111.31	108.46
3	26.50	25.00	108.05	
IF 50 - 0.50M				
1	37.90	25.00	154.54	
2	38.60	25.00	157.39	157.53
3	39.40	25.00	160.65	
IF 50 - 0.75M				
1	26.20	25.00	106.83	
2	30.50	25.00	124.36	119.06
3	30.90	25.00	125.99	
IF 50 - 1.00M				
1	28.40	25.00	115.80	
2	30.00	25.00	122.32	119.33
3	29.40	25.00	119.88	
IF 50 - 1.25M				
1	22.00	25.00	89.70	
2	22.00	25.00	89.70	91.06
3	23.00	25.00	93.78	

ตารางภาคผนวกที่ ง-10 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF60-NaOH

IF 60 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	24.80	25.00	101.12	
2	26.00	25.00	106.01	104.25
3	25.90	25.00	105.61	
IF 60 - 0.50M				
1	35.00	25.00	142.71	
2	27.10	25.00	110.50	135.37
3	31.40	25.00	128.03	
IF 60 - 0.75M				
1	30.20	25.00	123.14	
2	31.00	25.00	126.40	125.72
3	31.30	25.00	127.62	
IF 60 - 1.00M				
1	25.20	25.00	102.75	
2	24.00	25.00	97.86	100.31
3	24.60	25.00	100.31	
IF 60 - 1.25M				
1	21.80	25.00	88.89	
2	20.20	25.00	82.36	83.72
3	19.60	25.00	79.92	

3. อายุมอร์ตาร์ที่ 14 วัน

ตารางภาคผนวกที่ ง-11 กำลังอัดที่อายุ 14 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสมควบคุม

IF 30	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	49.20	25.00	200.61	
2	40.90	25.00	166.77	180.90
3	43.00	25.00	175.33	
IF 40				
1	39.10	25.00	159.43	
2	33.00	25.00	134.56	146.92
3	36.00	25.00	146.79	
IF 50				
1	32.20	25.00	131.29	
2	31.70	25.00	129.26	129.94
3	31.70	25.00	129.26	
IF 60				
1	25.00	25.00	101.94	
2	26.10	25.00	106.42	103.70
3	25.20	25.00	102.75	

ตารางภาคผนวกที่ ง-12 กำลังอัดที่อายุ 14 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF30-NaOH

IF 30 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	43.90	25.00	179.00	
2	36.00	25.00	146.79	173.70
3	41.30	25.00	168.40	
IF 30 - 0.50M				
1	56.20	25.00	229.15	
2	50.60	25.00	206.32	215.56
3	51.80	25.00	211.21	
IF 30 - 0.75M				
1	44.40	25.00	181.04	
2	46.80	25.00	190.83	185.93
3	38.00	25.00	154.94	
IF 30 - 1.00M				
1	35.59	25.00	145.12	
2	34.70	25.00	141.49	142.97
3	34.90	25.00	142.30	
IF 30 - 1.25M				
1	27.80	25.00	113.35	
2	27.90	25.00	113.76	116.89
3	30.30	25.00	123.55	

ตารางภาคผนวกที่ ง-13 กำลังอัดที่อายุ 14 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF40-NaOH

IF 40 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	38.00	25.00	154.94	
2	31.40	25.00	128.03	141.49
3	27.30	25.00	111.31	
IF 40 - 0.50M				
1	42.00	25.00	171.25	
2	45.90	25.00	187.16	182.94
3	46.70	25.00	190.42	
IF 40 - 0.75M				
1	39.10	25.00	159.43	
2	36.40	25.00	148.42	154.81
3	38.40	25.00	156.57	
IF 40 - 1.00M				
1	39.10	25.00	159.43	
2	36.40	25.00	148.42	154.81
3	38.40	25.00	156.57	
IF 40 - 1.25M				
1	29.30	25.00	119.47	
2	29.00	25.00	118.25	118.86
3	30.30	25.00	123.55	

ตารางภาคผนวกที่ ง-14 กำลังอัดที่อายุ 14 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF50-NaOH

IF 50 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	37.90	25.00	154.54	
2	39.90	25.00	162.69	159.16
3	39.30	25.00	160.24	
IF 50 - 0.50M				
1	44.20	25.00	180.22	
2	47.60	25.00	194.09	202.45
3	51.70	25.00	210.81	
IF 50 - 0.75M				
1	37.60	25.00	153.31	
2	37.60	25.00	153.31	154.13
3	38.20	25.00	155.76	
IF 50 - 1.00M				
1	39.80	25.00	162.28	
2	37.00	25.00	150.87	159.02
3	40.20	25.00	163.91	
IF 50 - 1.25M				
1	25.30	25.00	103.16	
2	31.20	25.00	127.22	125.79
3	30.50	25.00	124.36	

ตารางภาคผนวกที่ ง-15 กำลังอัดที่อายุ 14 วัน มอรัตารี่ส่วนผสม IF60-NaOH

IF 60 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	33.00	25.00	134.56	
2	30.90	25.00	125.99	130.62
3	32.20	25.00	131.29	
IF 60 - 0.50M				
1	38.40	25.00	156.57	
2	39.00	25.00	159.02	158.61
3	39.40	25.00	160.65	
IF 60 - 0.75M				
1	34.40	25.00	140.27	
2	33.30	25.00	135.78	136.05
3	32.40	25.00	132.11	
IF 60 - 1.00M				
1	30.30	25.00	123.55	
2	30.30	25.00	123.55	123.55
3	28.10	25.00	114.58	
IF 60 - 1.25M				
1	27.00	25.00	110.09	
2	27.00	25.00	110.09	110.09
3	18.00	25.00	73.39	

4. อายุมอร์ตาร์ที่ 28 วัน

ตารางภาคผนวกที่ ง-16 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสมควบคุม

IF 30	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	52.90	25.00	215.70	
2	53.70	25.00	218.96	218.82
3	54.40	25.00	221.81	
IF 40				
1	50.30	25.00	205.10	
2	42.30	25.00	172.48	186.75
3	44.80	25.00	182.67	
IF 50				
1	38.60	25.00	157.39	
2	43.50	25.00	177.37	165.95
3	40.00	25.00	163.10	
IF 60				
1	37.10	25.00	151.27	
2	35.80	25.00	145.97	148.83
3	36.60	25.00	149.24	

ตารางภาคผนวกที่ ง-17 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF30-NaOH

IF 30 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	44.70	25.00	182.26	
2	55.70	25.00	227.12	232.01
3	58.10	25.00	236.90	
IF 30 - 0.50M				
1	70.10	25.00	285.83	
2	64.30	25.00	262.18	270.74
3	64.80	25.00	264.22	
IF 30 - 0.75M				
1	55.10	25.00	224.67	
2	57.30	25.00	233.64	224.67
3	52.90	25.00	215.70	
IF 30 - 1.00M				
1	48.30	25.00	196.94	
2	47.70	25.00	194.50	193.14
3	46.10	25.00	187.97	
IF 30 - 1.25M				
1	38.40	25.00	156.57	
2	42.10	25.00	171.66	159.57
3	36.90	25.00	150.46	

ตารางภาคผนวกที่ ง-18 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF40-NaOH

IF 40 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	44.80	25.00	182.67	
2	49.00	25.00	199.80	191.23
3	50.30	25.00	205.10	
IF 40 - 0.50M				
1	55.10	25.00	224.67	
2	57.50	25.00	234.45	228.61
3	55.60	25.00	226.71	
IF 40 - 0.75M				
1	48.70	25.00	198.57	
2	49.60	25.00	202.24	194.90
3	45.10	25.00	183.89	
IF 40 - 1.00M				
1	46.70	25.00	190.42	
2	43.00	25.00	175.33	183.35
3	45.20	25.00	184.30	
IF 40 - 1.25M				
1	36.40	25.00	148.42	
2	35.90	25.00	146.38	147.40
3	37.10	25.00	151.27	

ตารางภาคผนวกที่ ง-19 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน มอรัตารี่ส่วนผสม IF50-NaOH

IF 50 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	48.50	25.00	197.76	
2	45.10	25.00	183.89	189.74
3	46.00	25.00	187.56	
IF 50 - 0.50M				
1	59.10	25.00	240.98	
2	59.80	25.00	243.83	242.00
3	58.90	25.00	240.16	
IF 50 - 0.75M				
1	46.30	25.00	188.79	
2	47.40	25.00	193.27	189.60
3	45.80	25.00	186.75	
IF 50 - 1.00M				
1	47.70	25.00	194.50	
2	48.90	25.00	199.39	197.08
3	48.40	25.00	197.35	
IF 50 - 1.25M				
1	37.30	25.00	152.09	
2	37.40	25.00	152.50	150.46
3	36.40	25.00	148.42	

ตารางภาคผนวกที่ ง-20 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF60-NaOH

IF 60 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	40	25.00	163.10	
2	38.6	25.00	157.39	158.75
3	38.2	25.00	155.76	
IF 60 - 0.50M				
1	42.70	25.00	174.11	
2	45.50	25.00	185.52	180.22
3	44.40	25.00	181.04	
IF 60 - 0.75M				
1	45.40	25.00	185.12	
2	44.80	25.00	182.67	185.39
3	46.20	25.00	188.38	
IF 60 - 1.00M				
1	37.70	25.00	153.72	
2	37.30	25.00	152.09	152.91
3	37.60	25.00	153.31	
IF 60 - 1.25M				
1	31.20	25.00	127.22	
2	32.40	25.00	132.11	129.94
3	32.00	25.00	130.48	

5. อายุมอร์ตาร์ที่ 60 วัน

ตารางภาคผนวกที่ ง-21 กำลังอัดที่อายุ 60 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสมควบคุม

IF 30	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	68.90	25.00	280.94	
2	65.30	25.00	266.26	268.16
3	63.10	25.00	257.29	
IF 40				
1	54.30	25.00	221.41	
2	55.00	25.00	224.26	227.12
3	57.80	25.00	235.68	
IF 50				
1	48.60	25.00	198.17	
2	47.50	25.00	193.68	193.41
3	46.20	25.00	188.38	
IF 60				
1	40.10	25.00	163.51	
2	39.50	25.00	161.06	162.15
3	39.70	25.00	161.88	

ตารางภาคผนวกที่ ง-22 กำลังอัดที่อายุ 60 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF30-NaOH

IF 30 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	65.30	25.00	266.26	
2	69.90	25.00	285.02	273.87
3	66.30	25.00	270.34	
IF 30 - 0.50M				
1	76.90	25.00	313.56	
2	74.40	25.00	303.36	306.49
3	74.20	25.00	302.55	
IF 30 - 0.75M				
1	63.10	25.00	257.29	
2	67.30	25.00	274.41	258.65
3	59.90	25.00	244.24	
IF 30 - 1.00M				
1	55.80	25.00	227.52	
2	57.50	25.00	234.45	223.85
3	51.40	25.00	209.58	
IF 30 - 1.25M				
1	45.50	25.00	185.52	
2	44.00	25.00	179.41	180.09
3	43.00	25.00	175.33	

ตารางภาคผนวกที่ ง-23 กำลังอัดที่อายุ 60 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF40-NaOH

IF 40 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	55.80	25.00	227.52	
2	53.20	25.00	216.92	222.22
3	59.30	25.00	241.79	
IF 40 - 0.50M				
1	61.20	25.00	249.54	
2	59.90	25.00	244.24	250.36
3	63.10	25.00	257.29	
IF 40 - 0.75M				
1	53.00	25.00	216.11	
2	52.90	25.00	215.70	211.76
3	49.90	25.00	203.47	
IF 40 - 1.00M				
1	47.70	25.00	194.50	
2	49.00	25.00	199.80	201.02
3	51.20	25.00	208.77	
IF 40 - 1.25M				
1	46.00	25.00	187.56	
2	45.50	25.00	185.52	186.54
3	47.10	25.00	192.05	

ตารางภาคผนวกที่ ง-24 กำลังอัดที่อายุ 60 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF50-NaOH

IF 50 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	54.90	25.00	223.85	
2	56.00	25.00	228.34	223.85
3	53.80	25.00	219.37	
IF 50 - 0.50M				
1	67.80	25.00	276.45	
2	65.80	25.00	268.30	268.43
3	63.90	25.00	260.55	
IF 50 - 0.75M				
1	54.60	25.00	222.63	
2	59.00	25.00	240.57	234.18
3	58.70	25.00	239.35	
IF 50 - 1.00M				
1	51.20	25.00	208.77	
2	53.10	25.00	216.51	217.06
3	55.40	25.00	225.89	
IF 50 - 1.25M				
1	42.20	25.00	172.07	
2	46.00	25.00	187.56	179.82
3	42.20	25.00	172.07	

ตารางภาคผนวกที่ ง-25 กำลังอัดที่อายุ 60 วัน มอร์ตาร์ส่วนผสม IF60-NaOH

IF 60 - 0.25M	Force (kN)	Section (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	42.20	25.00	172.07	
2	46.40	25.00	189.19	178.87
3	43.00	25.00	175.33	
IF 60 - 0.50M				
1	49.80	25.00	203.06	
2	48.60	25.00	198.17	196.13
3	45.90	25.00	187.16	
IF 60 - 0.75M				
1	54.00	25.00	220.18	
2	53.60	25.00	218.55	218.55
3	53.20	25.00	216.92	
IF 60 - 1.00M				
1	49.00	25.00	199.80	
2	48.30	25.00	196.94	200.07
3	49.90	25.00	203.47	
IF 60 - 1.25M				
1	38.90	25.00	158.61	
2	36.20	25.00	147.60	151.55
3	36.40	25.00	148.42	

ภาคผนวก จ
กำลังอัดของคอนกรีต

1. อายุคอนกรีตที่ 3 วัน

ตารางภาคผนวกที่ จ-1 กำลังอัดที่อายุ 3 วัน คอนกรีต

IF40	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	152	100	154	
2	151	100	153	153
3	150	100	152	
IF50				
1	134	100	136	
2	128	100	130	133
3	131	100	134	
IF60				
1	88	100	90	
2	103	100	105	97
3	94	100	96	
IF40-025M				
1	165	100	169	
2	162	100	165	166
3	162	100	165	
IF40-0.50M				
1	183	100	187	
2	186	100	189	190
3	189	100	193	
IF40-0.75M				
1	163	100	166	
2	169	100	172	167
3	161	100	164	

ตารางภาคผนวกที่ จ-1 กำลังอัดที่อายุ 3 วัน คอนกรีต (ต่อ)

IF50-0.25M	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	154	100	157	
2	137	100	139	147
3	142	100	145	
IF50-0.50M				
1	203	100	207	
2	201	100	205	205
3	200	100	204	
IF50-0.75M				
1	135	100	138	
2	138	100	140	140
3	140	100	143	
IF60-0.25M				
1	106	100	108	
2	104	100	106	106
3	101	100	103	
IF60-0.50M				
1	150	100	153	
2	143	100	146	147
3	141	100	143	
IF60-0.75M				
1	123	100	126	
2	125	100	127	124
3	116	100	118	

ตารางภาคผนวกที่ จ-2 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน คอนกรีต

IF40	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	195.60	100	199.39	
2	210.80	100	214.88	208.43
3	207.00	100	211.01	
IF50				
1	165.40	100	168.60	
2	162.50	100	165.65	166.02
3	160.70	100	163.81	
IF60				
1	130.60	100	133.13	
2	134.70	100	137.31	142.07
3	152.80	100	155.76	
IF40-0.25M				
1	206.00	100	209.99	
2	199.50	100	203.36	214.58
3	226.00	100	230.38	
IF40-0.50M				
1	235.40	100	239.96	
2	230.10	100	234.56	239.14
3	238.30	100	242.92	
IF40-0.75M				
1	208.70	100	212.74	
2	221.60	100	225.89	216.38
3	206.50	100	210.50	

ตารางภาคผนวกที่ จ-2 กำลังอัดที่อายุ 7 วัน คอนกรีต (ต่อ)

IF50-0.25M	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	181.20	100	184.71	
2	189.00	100	192.66	186.54
3	178.80	100	182.26	
IF50-0.50M				
1	249.20	100	254.03	
2	250.70	100	255.56	255.86
3	253.10	100	258.00	
IF50-0.75M				
1	177.20	100	180.63	
2	167.50	100	170.74	177.23
3	176.90	100	180.33	
IF60-0.25M				
1	136.70	100	139.35	
2	142.90	100	145.67	146.31
3	151.00	100	153.92	
IF60-0.50M				
1	199.20	100	203.06	
2	201.30	100	205.20	204.62
3	201.70	100	205.61	
IF60-0.75M				
1	183.00	100	186.54	
2	189.60	100	193.27	188.07
3	180.90	100	184.40	

ตารางภาคผนวกที่ จ-3 กำลังอัดที่อายุ 14 วัน คอนกรีต

IF40	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	273.90	100	279.20	
2	277.20	100	282.57	282.06
3	279.00	100	284.40	
IF50				
1	244.60	100	249.34	
2	246.20	100	250.97	251.48
3	249.30	100	254.13	
IF60				
1	205.00	100	208.97	
2	197.00	100	200.82	208.09
3	210.40	100	214.48	
IF40-0.25M				
1	284.20	100	289.70	
2	285.70	100	291.23	292.56
3	291.10	100	296.74	
IF40-0.50M				
1	311.40	100	317.43	
2	298.70	100	304.49	312.50
3	309.60	100	315.60	
IF40-0.75M				
1	274.90	100	280.22	
2	291.70	100	297.35	291.27
3	290.60	100	296.23	

ตารางภาคผนวกที่ จ-3 กำลังอัดที่อายุ 14 วัน คอนกรีต (ต่อ)

IF50-0.25M	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	252.40	100	257.29	
2	258.50	100	263.51	262.05
3	260.30	100	265.34	
IF50-0.50M				
1	312.60	100	318.65	
2	319.20	100	325.38	323.68
3	320.80	100	327.01	
IF50-0.75M				
1	255.40	100	260.35	
2	250.90	100	255.76	259.19
3	256.50	100	261.47	
IF60-0.25M				
1	237.10	100	241.69	
2	232.00	100	236.49	241.56
3	241.80	100	246.48	
IF60-0.50M				
1	264.60	100	269.72	
2	259.70	100	264.73	267.82
3	263.90	100	269.01	
IF60-0.75M				
1	249.50	100	254.33	
2	246.50	100	251.27	250.32
3	240.70	100	245.36	

ตารางภาคผนวกที่ จ-4 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน คอนกรีต

IF40	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	312.50	100	318.55	
2	315.00	100	321.10	319.37
3	312.40	100	318.45	
IF50				
1	290.90	100	296.53	
2	298.50	100	304.28	298.57
3	289.30	100	294.90	
IF60				
1	246.70	100	251.48	
2	250.70	100	255.56	252.46
3	245.60	100	250.36	
IF40-025M				
1	320.60	100	326.81	
2	321.90	100	328.13	331.84
3	334.10	100	340.57	
IF40-0.50M				
1	339.50	100	346.08	
2	338.00	100	344.55	346.25
3	341.50	100	348.11	
IF40-0.75M				
1	312.00	100	318.04	
2	309.50	100	315.49	316.14
3	308.90	100	314.88	

ตารางภาคผนวกที่ จ-4 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน คอนกรีต (ต่อ)

IF50-0.25M	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	301.50	100	307.34	
2	299.30	100	305.10	307.95
3	305.50	100	311.42	
IF50-0.50M				
1	348.00	100	354.74	
2	360.80	100	367.79	362.90
3	359.20	100	366.16	
IF50-0.75M				
1	313.40	100	319.47	
2	310.90	100	316.92	319.40
3	315.70	100	321.81	
IF60-0.25M				
1	260.60	100	265.65	
2	262.10	100	267.18	265.10
3	257.50	100	262.49	
IF60-0.50M				
1	279.60	100	285.02	
2	284.70	100	290.21	289.26
3	287.00	100	292.56	
IF60-0.75M				
1	296.00	100	301.73	
2	300.50	100	306.32	303.13
3	295.60	100	301.33	

ตารางภาคผนวกที่ จ-5 กำลังอัดที่อายุ 60 วัน คอนกรีต

IF40	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	330.50	100	336.90	
2	329.00	100	335.37	338.06
3	335.40	100	341.90	
IF50				
1	310.90	100	316.92	
2	308.50	100	314.48	316.58
3	312.30	100	318.35	
IF60				
1	269.70	100	274.92	
2	270.70	100	275.94	273.87
3	265.60	100	270.74	
IF40-0.25M				
1	320.60	100	326.81	
2	321.90	100	328.13	331.84
3	334.10	100	340.57	
IF40-0.50M				
1	353.50	100	360.35	
2	348.00	100	354.74	357.12
3	349.50	100	356.27	
IF40-0.75M				
1	322.00	100	328.24	
2	319.50	100	325.69	329.73
3	328.90	100	335.27	

ตารางภาคผนวกที่ จ-5 กำลังอัดที่อายุ 60 วัน คอนกรีต (ต่อ)

IF50-0.25M	P (kN)	Area (cm ²)	Strength (ksc)	Average (ksc)
1	310.50	100	316.51	
2	309.30	100	315.29	317.80
3	315.50	100	321.61	
IF50-0.50M				
1	381.00	100	388.38	
2	375.80	100	383.08	386.00
3	379.20	100	386.54	
IF50-0.75M				
1	330.70	100	337.10	
2	327.50	100	333.84	335.92
3	330.40	100	336.80	
IF60-0.25M				
1	290.60	100	296.23	
2	290.10	100	295.72	297.04
3	293.50	100	299.18	
IF60-0.50M				
1	304.60	100	310.50	
2	304.70	100	310.60	311.35
3	307.00	100	312.95	
IF60-0.75M				
1	312.00	100	318.04	
2	310.50	100	316.51	318.76
3	315.60	100	321.71	