



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

EFFECT OF HIGH VOLUME REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE WITH BOTTOM ASH ON FLOW, SETTING TIME, COMPRESSIVE STRENGTH AND SHRINKAGE OF MORTAR

ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณสูงต่อการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดและการหดตัวของมอร์ตาร์

วิวัฒน์ ครูดำ¹ วิศวินทร์ อัครปัญญาธร² รักษิพงษ์ สหมิตรมงคล³

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

³อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: September 6, 2016.

Received Revised Form:

December 17, 2016

Accepted: December 19, 2016

ABSTRACT:

This research is to study the effect of high volume bottom ash, as a replacement of fine aggregate, on flow, rate of flow loss, setting time, compressive strength and shrinkage of mortar. Behaviors of the mortar in each situation are compared. Two types of mortar, one with solely the river sand (control mortar) and the other with bottom ash for 45% by volume of total fine aggregate, were studied with the water to binder ratios of 0.35 and 0.50. In the case of water to binder ratio = 0.35, there is also the case where fly ash is used as a partial replacement of cement. The results show that, the initial flow and flow at 2 hours of mixtures with high volume bottom ash were higher than those of the control mortar, but the setting time did not change significantly. In addition, the replacement of sand with bottom ash does not reduce the compressive strength while the autogenous shrinkage is reduced. Nevertheless, the replacement of sand with bottom ash increases the total shrinkage because of higher drying shrinkage. The results also showed that, the mixtures using fly ash as a part of the binder, and bottom ash as a fine aggregate, in case of water to binder ratio = 0.35, have similar setting time and kept total shrinkage to those of the control mortar.

**Corresponding Author,*

Email: krudam_3821@hotmail.com,

a.wissawin@gmail.com, raktipong.sah@kmutt.ac.th

KEYWORDS: Bottom ash, Flow, Setting time, Compressive strength, Shrinkage

บทคัดย่อ :

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของเอ็กกันเตาในการแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่สูงต่อการไหลผ่าน อัตราการสูญเสียการไหลผ่าน (Rate of flow loss) ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด และการหดตัวของมอร์ตาร์ โดยเปรียบเทียบพฤติกรรมต่างๆของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียวกับมอร์ตาร์ที่มีเอ็กกันเตาแทนที่ทรายร้อยละ 45 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ 0.50 ในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 มีการศึกษาผลจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเอ็กกันเตาด้วยจากการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเอ็กกันเตาแทนที่ทรายในปริมาณที่สูงมีค่าการไหลผ่านเริ่มต้นและการไหลผ่านที่ 2 ชั่วโมงมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมแต่มีระยะเวลาการก่อตัวที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เอ็กกันเตาแทนที่ทรายไม่ได้ส่งผลเสียต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์และยังช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัส อย่างไรก็ตามการใช้เอ็กกันเตาแทนที่ทรายเพิ่มการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งที่เพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษายังแสดงอีกว่าการใช้เอ็กกันเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ควบคู่ไปกับการใช้เอ็กกันเตาแทนที่ทรายในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้นและช่วยควบคุมการหดตัวโดยรวมให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม

คำสำคัญ: เอ็กกันเตา, การไหลผ่าน, ระยะเวลาการก่อตัว, กำลังอัด, การหดตัว

1. บทนำ

เอ็กกันเตาเป็นเถ้าจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า และเป็นผลพลอยได้จากผลิตไฟฟ้า เช่นเดียวกับเถ้าลอย โดยปัจจุบันเถ้าลอยนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเถ้าลอยสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตและเถ้าลอยทำให้สมบัติของคอนกรีตดีขึ้นในด้านการยุบตัวของคอนกรีตสด เพิ่มระยะเวลาในการทำงาน เพิ่มกำลังอัดในช่วงปลาย รวมทั้งด้านการหดตัวแต่ อุตสาหกรรมคอนกรีตของประเทศไทยยังไม่มีมีการนำเอ็กกันเตามาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลสำหรับการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตอย่างเพียงพอ โดยเอ็กกันเตามีขนาดอนุภาคใหญ่ มีความพรุนสูงและมีการกระจายตัวใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด

การเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวโดยทั่วไปประกอบไปด้วยการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ซึ่งการหดตัวทั้ง 2 แบบเกิดจากกลไกที่แตกต่างกัน คือ การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับ

การสูญเสียความชื้นภายในช่องว่างคาปิลารีในพาสต์ ส่วนของการหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียความชื้นไปสู่สิ่งแวดล้อม [1] จะเห็นได้ว่าการหดตัวทั้งสองแบบนี้ต่างก็มีความเกี่ยวข้องกับความชื้นในคอนกรีต

เอ็กกันเตาซึ่งเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงและมีสมบัติที่สามารถกักเก็บน้ำสูงนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะเป็นวัสดุบ่มภายในคอนกรีตได้ ทั้งนี้การใช้วัสดุบ่มภายในสามารถลดการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของคอนกรีต [2-3] และยังสามารถลดการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตได้ในกรณีที่แทนที่เอ็กกันเตาในมวลรวมละเอียดน้อยกว่าร้อยละ 30 หากเปรียบเทียบในกรณีที่ค่ายุบตัวของคอนกรีตเท่ากัน [4] จะเห็นได้ว่าเอ็กกันเตามีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายในได้ แต่ก็ยังไม่เคยมีการศึกษากรณีที่ใช้เอ็กกันเตาในปริมาณที่สูงกว่านั้น การขาดแคลนข้อมูลดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้งานเอ็กกันเตายังค่อนข้างจำกัด ด้วยเหตุนี้จึงควรพัฒนาองค์ความรู้เพื่อให้สามารถใช้เอ็กกันเตาในการเป็นส่วนผสมของคอนกรีตได้มากขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลแผ่ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด และการหดตัวของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่สูง รวมไปถึงผลของเถ้าลอยต่อสัดส่วนผสมที่มีลักษณะดังกล่าว ซึ่งผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงและการใช้เถ้าก้นเตาในการลดการหดตัวของคอนกรีตต่อไปในอนาคต

2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะ 3.15 และเถ้าลอยจาก 2 แหล่ง คือ เถ้าลอยจากกระยอง (BFA) กับเถ้าลอยจากลำปาง (MFA) มีความถ่วงจำเพาะ 2.23 และ 2.44 ตามลำดับ โดยมีองค์ประกอบเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

2.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษา คือ หยาบแม่น้ำและเถ้าก้นเตาจาก 2 แหล่ง คือ เถ้าก้นเตาจากกระยอง (BBA) กับเถ้าก้นเตาจากลำปาง (MBA) โดยมีสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

รูปที่ 1 เปรียบเทียบขนาดผลของทรายกับเถ้าก้นเตา ในขณะที่รูปที่ 2 เป็นภาพถ่ายขยายกำลังสูงโดยวิธี SEM (1,000 เท่า) แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าก้นเตาเปรียบเทียบกับเถ้าลอย โดยมีการร่อนมวลรวมละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 4

ทรายที่นำมาใช้ผสมมอร์ตาร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ตามมาตรฐาน ASTM C128 [5] ส่วนเถ้าก้นเตาอยู่ในสภาวะเปียกผิวแห้ง (SD) ตามมาตรฐาน ASTM C1761 [6]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา

Chemical composition	Cement Type 1	BFA	MFA	BBA	MBA
SiO ₂ (%)	20.90	40.60	20.19	55.29	15.14
Al ₂ O ₃ (%)	4.80	13.40	9.64	18.27	7.12
Fe ₂ O ₃ (%)	3.40	11.32	31.32	13.91	27.11
CaO (%)	65.40	26.27	29.24	4.06	28.57
K ₂ O (%)	0.45	1.82	2.94	2.35	2.39
TiO ₂ (%)	0.26	3.76	1.03	3.95	0.81
Others (%)	4.79	2.83	8.61	2.17	18.86

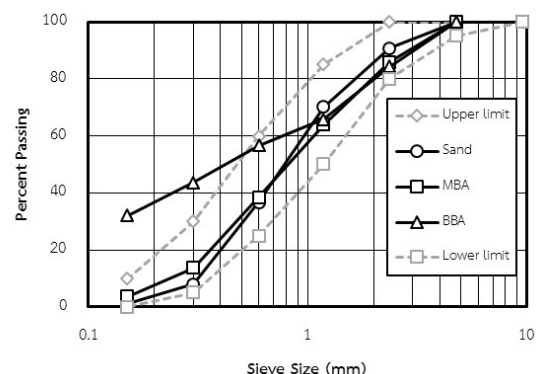
ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียด

Properties	Sand	BBA	MBA
Fineness modulus	2.95	2.17	2.93
Specific gravity (OD)	2.57	1.51	1.76
Specific gravity (SSD)	2.60	-	-
Specific gravity (SD)	-	1.71	2.09
Water absorption (%)	1.15	13.32	19.19

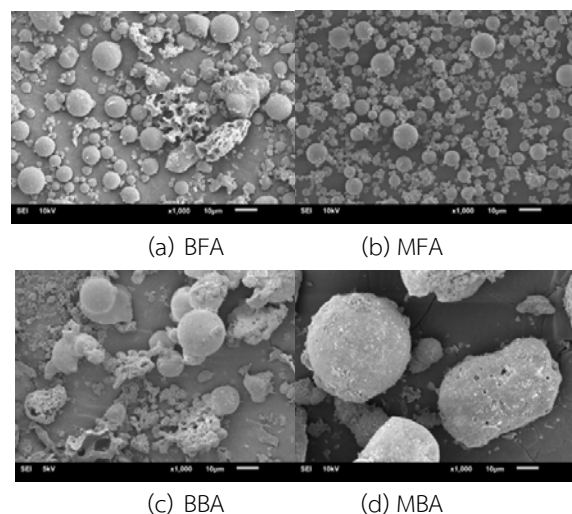
หมายเหตุ OD หมายถึง สภาวะแห้ง (Oven dry)

SSD หมายถึง สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry)

SD หมายถึง สภาวะเปียกผิวแห้ง (Wetted surface dry)



รูปที่ 1 ขนาดผลของทรายและเถ้าก้นเตา



รูปที่ 2 ภาพกำลังขยายกำลังสูง (SEM) ของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา (1000X)

3. วิธีการศึกษา

3.1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์และวิธีการผสมมอร์ตาร์

เพื่อศึกษาผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันตาในปริมาณที่สูงต่อการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด และการหดตัวของมอร์ตาร์ สำหรับกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 นั้นกำหนดให้สัดส่วนโดยปริมาตรระหว่างเพสต์และมวลรวมละเอียดมีค่าเท่ากับ 60:40 และมีการใช้วัสดุประสาน 2 แบบ คือ แบบแรกใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และแบบที่สองแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 นั้นกำหนดให้สัดส่วนโดยปริมาตรระหว่างเพสต์และมวลรวมละเอียด เท่ากับ 55:45 และมีการใช้วัสดุประสานเพียงแบบเดียว คือ ปูนซีเมนต์ล้วน

ในการศึกษานี้มีการเปรียบเทียบมวลรวมละเอียด 3 แบบคือ แบบแรกใช้ทรายล้วน แบบที่สองแทนที่ทรายด้วยเถ้ากันตาจากกระยอง (BBA) ร้อยละ 45 โดยปริมาตร และแบบที่สามแทนที่ทรายด้วยเถ้ากันตาจากลำปาง (MBA) ร้อยละ 45 โดยปริมาตร ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ทดสอบในการศึกษานี้

ทั้งนี้ทำการออกแบบสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยไม่คำนึงว่าอยู่ภายในของมวลรวมละเอียดตามคิดในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เพื่อควบคุมให้สัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นไปตามที่กำหนดทรายและเถ้ากันตาจะถูกเก็บไว้ในสภาวะที่มีความชื้นมากกว่าสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) และสภาวะเปียกผิวแห้ง (SD) ตามลำดับ และในการผสมมอร์ตาร์จะมีการหกลบน้ำที่ผิว (Surface water content) ของทรายและเถ้ากันตา ออกจากน้ำที่ใช้ผสมมอร์ตาร์ การผสมมอร์ตาร์เริ่มจากการใส่น้ำตามด้วยวัสดุประสานลงในหม้อผสมทำการเปิดเครื่องผสมแบบความเร็วต่ำเป็นระยะเวลา 30 วินาที แล้วใส่มวลรวมละเอียดในหม้อผสมแล้วผสมให้เข้ากันเป็นระยะเวลา 30 วินาที จากนั้นเปลี่ยนเป็นความเร็วปานกลางเป็นระยะเวลา 30 วินาที ทำการหยุดเครื่องผสมเป็นระยะเวลา 90 วินาที ระหว่างนั้นทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อผสม เมื่อครบ 90 วินาทีทำการเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วปานกลางเป็นระยะเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นก็นำมอร์ตาร์ที่ได้ไปทำการทดสอบและเก็บตัวอย่างในรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

Sample	Mix Proportion (kg/m ³)				
	Cement	Fly Ash	Sand	Bottom Ash	Water
W35	899	-	1038	-	315
W35BBA45	899	-	571	307	315
W35MBA45	899	-	571	377	315
W35BFA30BBA45	594	255	571	307	297
W35MFA30MBA45	604	259	571	377	302
W50	673	-	1168	-	336
W50BBA45	673	-	642	346	336
W50MBA45	673	-	642	424	336

หมายเหตุ :

W35 หมายถึง มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และทรายล้วน

W35BBA45 หมายถึง มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และแทนที่ทรายด้วยเถ้ากันตาจากกระยอง ร้อยละ 45 โดยปริมาตร

W35MBA45 หมายถึง มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และแทนที่ทรายด้วยเถ้ากันตาจากลำปาง ร้อยละ 45 โดยปริมาตร

W35BFA30BBA45 หมายถึง มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยจากกระยองโดยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และแทนที่ทรายด้วยเถ้ากันตาจากกระยอง ร้อยละ 45 โดยปริมาตร

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 การไหลแผ่ของมอร์ตาร์

การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230 [7] โดยผสมมอร์ตาร์จำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำการทดสอบทุก 30 นาที จนครบ 120 นาที

3.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C807 [8] โดยการผสมมอร์ตาร์จำนวน 3 ครั้ง

เพื่อหาค่าเฉลี่ยของระยะจมของเข็มไวแคตทุกๆ 15 นาที ดังกรณีตัวอย่างการทดสอบควบคุม (w35) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพิจารณาเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial setting time) และเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final setting time) เป็นเวลาที่ระยะจมของเข็มไวแคตมีค่าเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และ 0 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3.2.3 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C190 [9] ใช้ตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่างทั้งนี้ได้ทำการบ่มตัวอย่างโดยการห่อหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกทันทีหลังถอดตัวอย่างออกจากแบบจนถึงอายุทดสอบที่ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับ

3.2.4 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างทำการห่อหุ้มตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยพลาสติก 10 ชั้น และปิดด้วยเทปอลูมิเนียม 2 ชั้น แล้วจึงวัดความยาวเริ่มต้นของมอร์ตาร์ที่อายุ 12 ชั่วโมงหลังจากการผสม รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างทดสอบที่ได้รับการหุ้มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นตัวอย่างทดสอบเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ค่าการหดตัวที่รายงานในบทความนี้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 3 ตัวอย่าง

3.2.5 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างทำการห่อหุ้มตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยพลาสติก 10 ชั้น และปิดด้วยเทปอลูมิเนียม 2 ชั้น แล้วจึงวัดค่าความยาวเริ่มต้นของมอร์ตาร์ที่อายุ 12 ชั่วโมงหลังจากการผสม และหลังจากการผสมเป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำพลาสติกและเทปอลูมิเนียมออกจากตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อทำการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง โดยเก็บตัวอย่างที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 ผลการทดสอบที่ได้จากการวัดความยาวของมอร์ตาร์ที่อายุต่างๆ เป็นการหดตัวโดยรวมเมื่อได้ค่าการหดตัวโดยรวมแล้วก็จะสามารถคำนวณหาการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างที่อายุต่างๆ ด้วยการหักลบค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสที่อายุเดียวกันได้ตามสมการที่ 1

$$\Delta_T(t) = \Delta_A(t) + \Delta_D(t) \rightarrow \Delta_D(t) = \Delta_T(t) - \Delta_A(t) \quad (1)$$

โดยที่

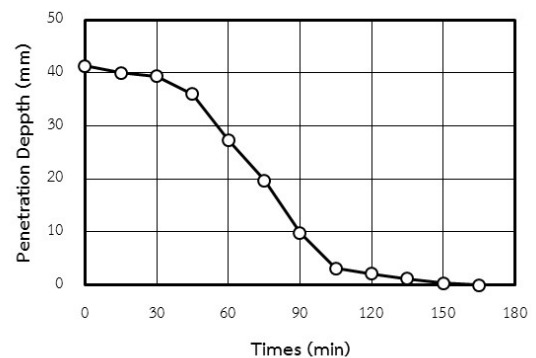
$\Delta_T(t)$ คือ การหดตัวโดยรวมที่อายุต่างๆ (Total Shrinkage)

$\Delta_A(t)$ คือ การหดตัวแบบออโตจีนัสที่อายุต่างๆ (Autogenous Shrinkage)

$\Delta_D(t)$ คือ การหดตัวแบบแห้งที่อายุต่างๆ (Drying Shrinkage)



รูปที่ 3 การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับระยะจมของเข็มไวแคต (W35)



(a) การห่อหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติก 10 ชั้น (b) การห่อหุ้มตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียม 2 ชั้น

รูปที่ 5 การห่อหุ้มตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

4. ผลการทดสอบและอภิปราย

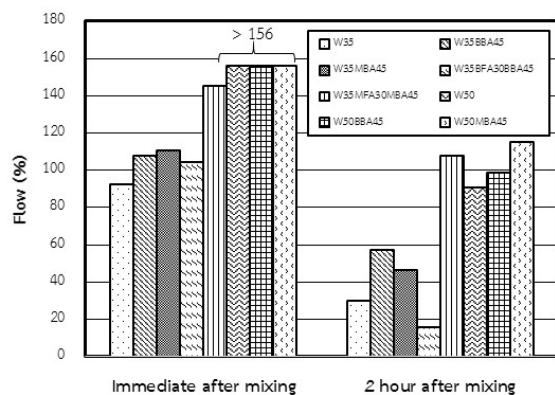
4.1 สมบัติของมอร์ตาร์สด

4.1.1 ค่าการไหลแผ่เริ่มต้นและค่าการไหลแผ่ที่ 2 ชั่วโมง

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบการไหลแผ่เริ่มต้นและการไหลแผ่ที่ 2 ชั่วโมง ในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 พบว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 มีการไหลแผ่ที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาทั้ง 2 แหล่ง W35BBA45, W35MBA45 การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดช่วยเพิ่มการไหลแผ่เริ่มต้นของมอร์ตาร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [10, 11] พฤติกรรมดังกล่าวอาจเกิดจากแรงเหวี่ยงและการชนกันระหว่างอนุภาคหรือระหว่างอนุภาคกับภาชนะระหว่างการผสมมอร์ตาร์ แรงเหวี่ยงหรือการชนกันที่เกิดขึ้นอาจทำให้น้ำภายในเถ้าก้นเตาบางส่วนออกมาระหว่างการผสมส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35BBA45 และ W35MBA45 มีค่าการไหลแผ่เริ่มต้นที่ใกล้เคียงกัน

ในกรณีของมอร์ตาร์ที่ผสมทั้งเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากกระยong W35BFA30BBA45 มีค่าการไหลแผ่เริ่มต้นที่มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 แต่น้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35BBA45 ทั้งนี้อาจจะเป็นเนื่องมาจากการที่เถ้าลอยจากกระยong (BFA) มีลักษณะที่พรุนกว่าปูนซีเมนต์และต้องการปริมาณน้ำเพื่อเคลื่อนตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ [12-13]

ในกรณีของมอร์ตาร์ที่ผสมทั้งเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากลำปาง W35MFA30MBA45 มีค่าการไหลแผ่เริ่มต้นที่มากกว่าทั้งมอร์ตาร์ควบคุม W35 และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35MBA45 เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยที่มีลักษณะกลมและมีความพรุนน้อย



รูปที่ 6 การไหลแผ่เริ่มต้น และการไหลแผ่ที่ 2 ชั่วโมงของมอร์ตาร์

หากเปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากกระยong W35BFA30BBA45 กับ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากลำปาง W35MFA30MBA45 จะพบว่า W35BFA30BBA45 มีค่าการไหลแผ่เริ่มต้นที่น้อยกว่า W35MFA30MBA45 ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะเกิดมาจากการที่เถ้าลอยจากกระยongต้องการน้ำมากกว่าในการเคลื่อนตัว ดังที่ได้มีการรายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [12-13]

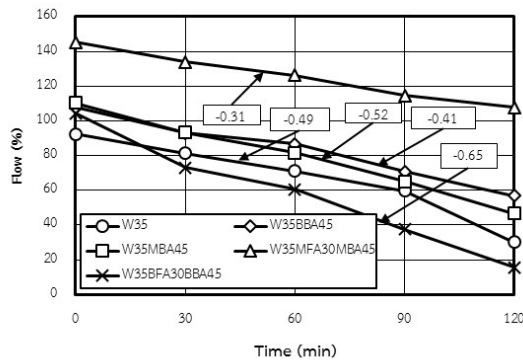
ผลการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่ 2 ชั่วโมงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 มอร์ตาร์ควบคุม W35 มีการไหลแผ่ที่ 2 ชม. น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมกับเถ้าก้นเตาทั้ง 2 แหล่ง (W35BBA45 และ W35MBA45) ซึ่งมีผลคล้ายกับกรณีของการไหลแผ่เริ่มต้น แต่มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35BBA45 มีค่าการไหลแผ่ที่ 2 ชม. มากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35MBA45 ถึงแม้ว่าค่าการไหลแผ่เริ่มต้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ในกรณีของมอร์ตาร์ที่ผสมทั้งเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากกระยong (BFA, BBA) มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา W35BFA30BBA45 มีค่าการไหลแผ่ที่ 2 ชม. ที่น้อยกว่าทั้งมอร์ตาร์ควบคุม W35 และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35BBA45 เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระที่ลดลงจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันขนาดละเอียดของเถ้าก้นเตาจากกระยong (BBA) มีปริมาณส่วนที่ละเอียดที่สูงกว่าและไม่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C128 [5] กำหนด แสดงดังรูปที่ 1 รวมทั้งเถ้าลอยจากกระยong (BFA) บางส่วนมีผิวที่ขรุขระ จึงต้องการปริมาณน้ำในการเคลื่อนตัวมากขึ้น โดยปริมาณน้ำภายในของเถ้าก้นเตาที่ออกมาบางส่วนไม่พอเพียงต่อความต้องการของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากกระยong (BFA, BBA) ที่จะรักษาความสามารถในการไหลแผ่ จึงส่งผลให้มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา W35BFA30BBA45 มีค่าการไหลแผ่ที่ 2 ชม. น้อยกว่าทั้งมอร์ตาร์ควบคุม W35 และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35BBA45

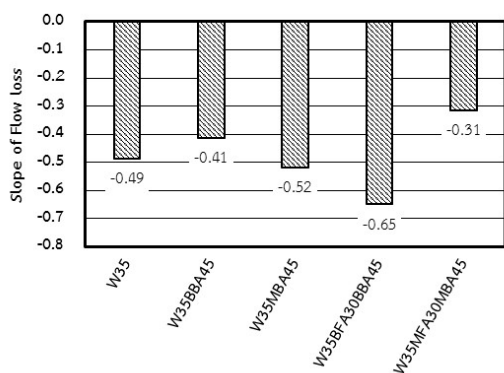
ส่วนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากลำปาง (MFA, MBA) มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา W35MFA30MBA45 มีค่าการไหลแผ่ที่ 2 ชม. มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 พฤติกรรมดังกล่าวน่าจะเกี่ยวข้องกับน้ำที่ออกมาจากเถ้าก้นเตาและอนุภาคที่กลมของเถ้าลอย แสดงให้เห็นว่าค่าการไหลแผ่ที่ 2 ชม. มากกว่าทั้งมอร์ตาร์ควบคุม W35 และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา W35MBA45 และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและ

เก้าอี้กันเตา W35BFA30BBA45 มีค่าการไหลแผ่นที่ 2 ซม. น้อยกว่า มอร์ตาร์ที่ผสมเกล็ดลอยและเก้าอี้กันเตา W35MFA30MBA45 ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับที่พบในกรณีของการไหลแผ่นเริ่มต้น

ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 มอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตาทั้ง 2 แหล่ง (W50BBA45 และ W50MBA45) มีค่าการไหลแผ่นที่ 2 ซม. มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W50 เนื่องจากน้ำบางส่วนภายในเก้าอี้กันเตาออกมาจึงทำให้มีน้ำอิสระในสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตาที่ 2 ซม. มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W50 และมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W50BBA45 มีค่าการไหลแผ่นที่ 2 ซม. น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W50MBA45 เนื่องจากเก้าอี้กันเตาจากกระยอง (BBA) มีขนาดคละที่ไม่ได้อยู่ในช่วงที่มาตรฐาน ASTM C128 [5] กำหนด แต่เก้าอี้กันเตาจากลำปาง (MBA) อยู่ในช่วงที่มาตรฐาน ASTM C128 [5] กำหนด แสดงดังรูปที่ 1



(a) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการไหลแผ่นของมอร์ตาร์



(b) อัตราการสูญเสียการไหลแผ่นของมอร์ตาร์

รูปที่ 7 อัตราการสูญเสียการไหลแผ่นของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35

4.1.2 อัตราการสูญเสียการไหลแผ่นของมอร์ตาร์

รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบอัตราการสูญเสียการไหลแผ่นของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 มอร์ตาร์ควบคุม W35 มีอัตราการสูญเสียการไหลแผ่นเร็วกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W35BBA45 แต่ช้ากว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W35MBA45 เล็กน้อย

ในกรณีของมอร์ตาร์ที่ผสมเกล็ดลอยและเก้าอี้กันเตาจากกระยอง (BFA, BBA) มอร์ตาร์ที่ผสมเกล็ดลอยและเก้าอี้กันเตา W35BFA30BBA45 มีอัตราการสูญเสียการไหลแผ่นเร็วกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 และมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W35BBA45

ส่วนกรณีมอร์ตาร์ที่ผสมเกล็ดลอยและเก้าอี้กันเตาจากลำปาง (MFA, MBA) มอร์ตาร์ที่ผสมเกล็ดลอยและเก้าอี้กันเตา W35MFA30MBA45 มีอัตราการสูญเสียการไหลแผ่นเท่ากับ -0.32 ช้ากว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 และมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W35MBA45 ความแตกต่างที่พบระหว่างวัสดุจาก 2 แหล่งดังกล่าวนี้จะเป็นเพราะลักษณะรูปร่างของอนุภาคของเกล็ดลอยจากแต่ละแหล่งที่แตกต่างกัน (เกล็ดลอยจากลำปางมีอนุภาคที่กลมกว่าเกล็ดลอยจากกระยอง)

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบอัตราการสูญเสียการไหลแผ่นของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 โดยนำค่าการไหลแผ่นที่ 1 ซม. ถึง 2 ซม. มาพิจารณาอัตราการสูญเสียการไหลแผ่น เนื่องจากการไหลแผ่นเริ่มต้นและการไหลแผ่นที่ 30 นาทีนั้นมากเกินไปที่จะวัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ มอร์ตาร์ควบคุม W50 มีอัตราการสูญเสียการไหลแผ่น ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตาจากกระยอง W50BBA45 แต่เร็วกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตาจากลำปาง W50MBA45 ทั้งนี้อาจจะเกี่ยวเนื่องกับขนาดคละของเก้าอี้กันเตาและองค์ประกอบเคมีของเกล็ดลอยทั้งสองแหล่งที่แตกต่างกัน

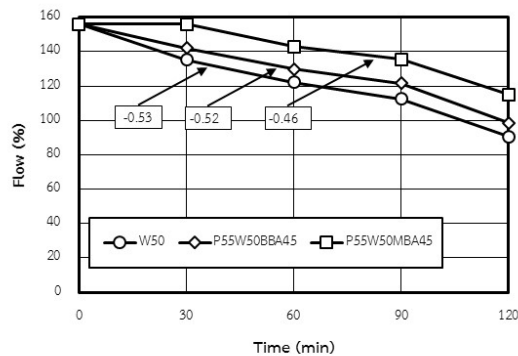
4.2 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์

4.2.1 กรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

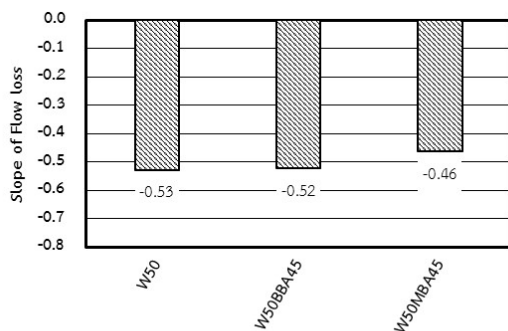
รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 มอร์ตาร์ควบคุม W35 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W35BBA45 และมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันเตา W35MBA45 แสดงให้เห็นว่าน้ำภายในเก้าอี้กันเตาที่ออกมาระหว่าง

ผสมไม่ได้มากพอที่จะส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ

มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตาทั้ง 2 แหล่ง (W35BFA30BBA45 และ W35MFA30MBA45) มีค่าระยะเวลาการก่อตัวมากกว่าของมอร์ตาร์ควบคุม (W35) ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย [14] ทั้งนี้ผลการทดสอบ

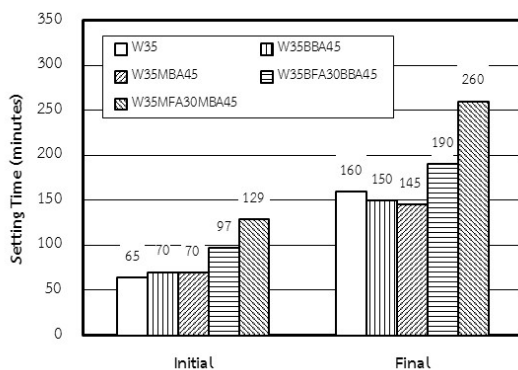


(a) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

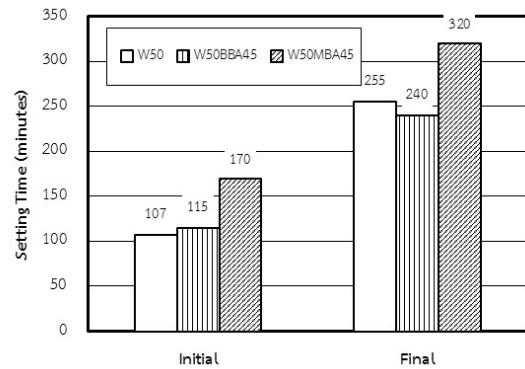


(b) อัตราการสูญเสียการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

รูปที่ 8 อัตราการสูญเสียการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50



รูปที่ 9 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35



รูปที่ 10 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50

แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตาจากกระยง W35BFA30BBA45 ก่อตัวเร็วกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตาจากลำปาง W35MFA30MBA45 อาจจะเกี่ยวข้องกับการที่เถ้าลอยจากกระยง (BFA) มีผิวที่ขรุขระกว่าเถ้าลอยจากลำปาง (MFA) ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระน้อยลง

4.2.2 กรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 มอร์ตาร์ควบคุม W50 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากันเตาจากกระยง W50BBA45 ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากันเตาจากลำปาง W50MBA45 มีระยะเวลาการก่อตัวยาวนานกว่าค่อนข้างมาก การที่เถ้ากันเตาจากลำปางส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวมากกว่าอาจจะเป็นเพราะความสามารถในการดูดซึมน้ำ (water absorption) ที่มากกว่าและขนาดคละ (grading) ที่ดีกว่าเถ้ากันเตาจากกระยง จุดที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือการที่เถ้ากันเตาจากลำปาง (MBA) ส่งผลให้การก่อตัวยาวนานขึ้นในกรณีของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 (W50MBA45 เทียบกับ W50) แต่ส่งผลน้อยมากในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 (W35MBA45 เทียบกับ W35) ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่า W35MBA45 มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าในขณะที่ปริมาณน้ำที่กักเก็บอยู่ภายในเถ้ากันเตามีปริมาณน้อยกว่า

4.3 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์

4.3.1 กรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

รูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 มอร์ตาร์

ผสมเถ้ากันเตาจากระยอง W35BBA45 โดยมีกำลังอัดประลัยต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 เล็กน้อย ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้ากันเตาจากลำปาง W35MBA45 มีกำลังอัดประลัยต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 เล็กน้อยที่อายุการบ่มที่ 3 วัน แต่มีกำลังอัดประลัยสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 เล็กน้อยที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน โดยรวมแล้วการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาส่งผลต่อกำลังอัดค่อนข้างน้อย (ไม่เกิน 10% เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม) ในกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35

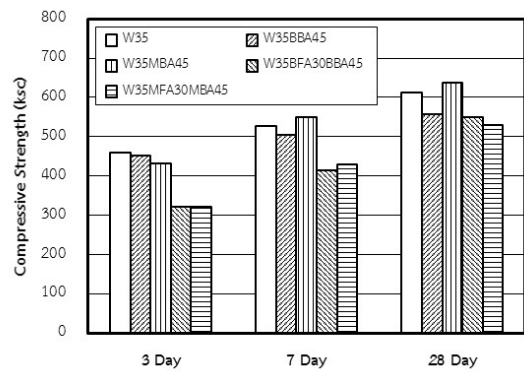
ส่วนกรณีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตาทั้ง 2 แหล่ง (W35BFA30BBA45 และ W35MFA30MBA45) มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตาทั้ง W35BFA30BBA45 และ W35MFA30MBA45 ที่อายุการบ่มช่วงต้น (3 และ 7 วัน) มีค่ากำลังอัดประลัยน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W35 ค่อนข้างมาก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงเนื่องจากถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอย แต่เมื่ออายุการบ่มที่ 28 วัน ก็พบว่าความแตกต่างของกำลังอัดประลัยก็ลดน้อยลงซึ่งน่าจะเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยเริ่มเกิดขึ้นมาเสริมให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่ามากขึ้น

4.3.2 กรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 มอร์ตาร์ควบคุม W50 มีค่ากำลังอัดประลัยใกล้เคียงมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้ากันเตา W50BBA45 และ W50MBA45 โดยมอร์ตาร์ทั้งสามแบบมีค่ากำลังอัดต่างกันไม่เกินร้อยละ 12 ในทุกอายุที่ทำการทดสอบ (3, 7 และ 28 วัน) ผลดังกล่าวประกอบกับผลของกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาในอัตราส่วน 45% โดยปริมาตรนั้น ไม่ได้ทำให้เกิดผลเสียต่อกำลังอัดมากเกินไปถึงแม้ว่าเถ้ากันเตาจะมีความพรุนสูงกว่าทรายก็ตาม

4.4 การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์

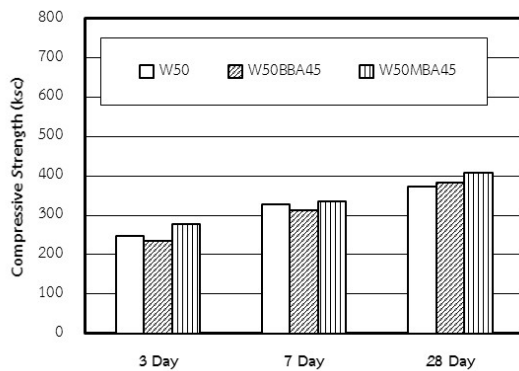
รูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 พบว่าการใช้เถ้ากันเตาทั้ง 2 แหล่ง (BBA, MBA) ช่วยลดการหดตัวแบบบอโตจีนัส โดยการหดตัวแบบบอโตจีนัสลดลงตามปริมาณร้อยละการดูดน้ำของเถ้ากันเตา การหดตัวแบบบอโตจีนัสเกิดจากการสูญเสียในช่องว่างคาปิลลารีเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน



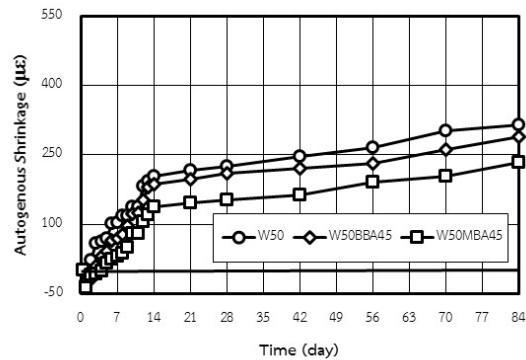
รูปที่ 11 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35

การลดลงของการหดตัวแบบบอโตจีนัส (การหดตัวของ W35BBA45 และ W35MBA45 น้อยลงเมื่อเทียบกับ W35) น่าจะเป็นผลมาจากกลไกอย่างน้อย 2 อย่าง คือ กลไกแรกน้ำภายในเถ้ากันเตาออกมาในระหว่างการผสมจึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น กลไกที่สองน้ำที่ยังคงอยู่ภายในเถ้ากันเตาหลังจากการผสมจะค่อยๆ ถูกปล่อยออกมาชดเชยกับน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และช่วยลด Capillary Suction ที่เกิดขึ้นในช่องว่างคาปิลลารี [11]

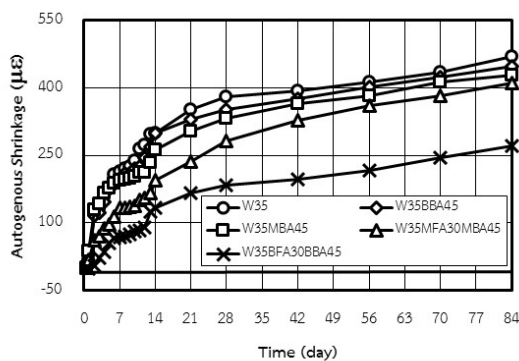
มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตาทั้ง 2 แหล่ง (W35BFA30BBA45 และ W35MFA30MBA45) มีการหดตัวแบบบอโตจีนัสน้อยลงไปอีก เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉลี่ยน้อยลง (เถ้าลอยทำปฏิกิริยาช้ากว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) นอกจากนี้ยังพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตา W35BFA30BBA45 มีการหดตัวแบบบอโตจีนัสที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตา W35MFA30MBA45 ทั้งนี้จะเป็นเพราะเถ้ากันเตาจากระยอง (BBA) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่น้อยมาก (ร้อยละ 4.06) ซึ่งบ่งชี้ว่ามีส่วนประกอบที่อาจจะทำปฏิกิริยากับน้ำน้อยกว่า ในขณะที่เดียวกันก็มีความเป็นไปได้ว่าความสามารถในการคายน้ำของเถ้ากันเตาจากระยอง BBA อาจจะดีกว่าเถ้ากันเตาจากลำปาง MBA ถึงแม้ว่าจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำน้อยกว่า ซึ่งอาจจะจำเป็นต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมคายน้ำของเถ้ากันเตาจากแต่ละแหล่งต่อไปในอนาคต



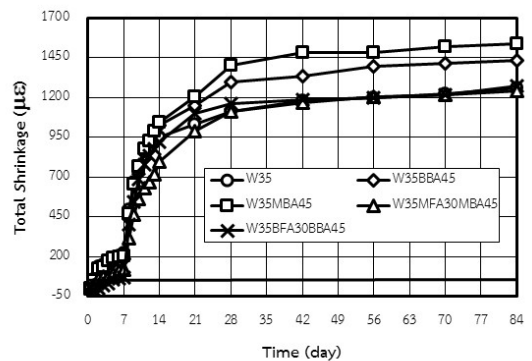
รูปที่ 12 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50



รูปที่ 14 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50



รูปที่ 13 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35



รูปที่ 15 การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35

4.4.2 กรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

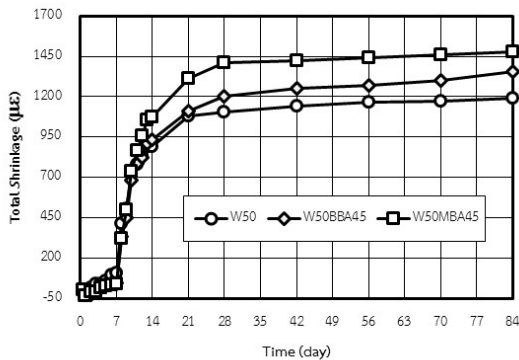
รูปที่ 14 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสน้อยกว่ากรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 (ดังแสดงในรูปที่ 13) และผลการทดสอบในรูปที่ 14 ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุผสมภายในนั้นสามารถช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัสในกรณีน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ได้เช่นกัน

4.5 การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์

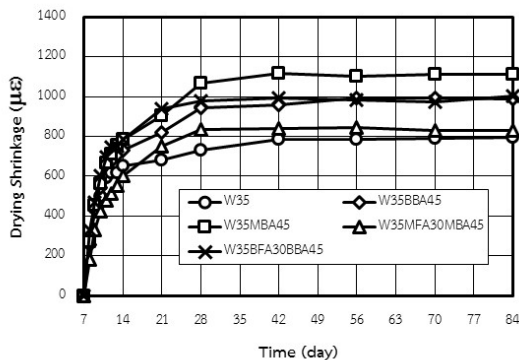
รูปที่ 15 แสดงผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา (W35BBA45 และ W35MBA45) มีการหดตัวโดยรวมในช่วง 7 วันแรกน้อยกว่า

มอร์ตาร์ควบคุม (W35) เล็กน้อยเพราะในช่วงดังกล่าวยังทำการหุ้มตัวอย่างทดสอบเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอยู่ อย่างไรก็ตามหลังจากนั้นพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา (W35BBA45 และ W35MBA45) มีการหดตัวโดยรวมเพิ่มขึ้นรวดเร็วและมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมอย่างชัดเจน ในขณะที่ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย และ เถ้าก้นเตา (W35BFA30BBA45 และ W35MFA30MBA45) นั้นมีการหดตัวโดยรวมพอๆ กับมอร์ตาร์ควบคุม (W35)

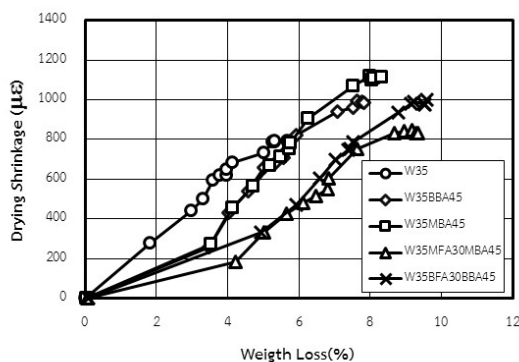
รูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ซึ่งพบว่ามอร์ตาร์ควบคุม W50 มีการหดตัวโดยรวมน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตา W50BBA45 และ W50MBA45 แนวโน้มดังกล่าวคล้ายคลึงกับกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35



รูปที่ 16 การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50



รูปที่ 17 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35

4.6 การหดตัวแบบแห้ง

4.6.1 กรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35

จากผลการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 เห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตา (W35BBA45 และ W35MBA45) นั้นมีการหดตัวโดยรวมมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (W35) ถึงแม้ว่าจะมีการหดตัวแบบบอโตจีนัสน้อยลงซึ่งบ่งชี้ว่าเถ้าก้นเตาเพิ่มการหดตัวแบบแห้งในกรณีดังกล่าว รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของตัวอย่างทดสอบ ($w/b=0.35$) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 โดยใช้ผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมและการหดตัวแบบบอโตจีนัสที่รายงานไปในหัวข้อ 4.4 และ 4.5 ซึ่งรูปที่ 17 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้เถ้าก้นเตาแทนทรายจะทำให้หดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้น (W35MBA45 และ W35BBA45 เทียบกับ W35)

การใช้เถ้าลอยควบคุมคู่ไปกับการใช้เถ้าก้นเตาจากลำปางจะช่วยควบคุมให้การหดตัวแบบแห้งน้อยลงมาก (W35MFA30MBA45 เทียบกับ W35MBA45) ซึ่งการใช้เถ้าลอยช่วยควบคุมการหดตัวแบบแห้งนี้ทำให้การหดตัวโดยรวมของตัวอย่างทดสอบที่ผสมทั้งเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยจากลำปาง (W35MFA30MBA45) นั้นมีค่าพอๆ กับตัวอย่างควบคุม (W35) ดังที่แสดงในรูปที่ 15 ในขณะที่การใช้เถ้าลอยควบคุมคู่ไปกับการใช้เถ้าก้นเตาจากระยองไม่ได้ส่งผลต่อการหดตัวแบบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ (W35BFA30BBA45 เทียบกับ W35BBA45) แต่ส่งผลต่อการหดตัวแบบบอโตจีนัสมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 13

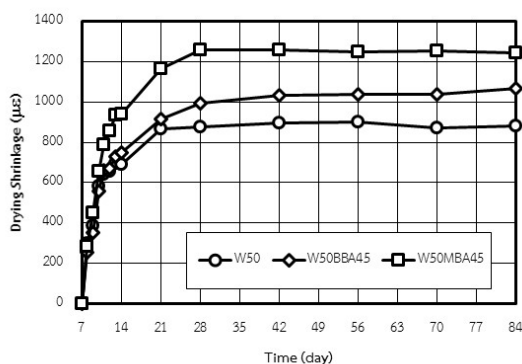
รูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 ซึ่งพบว่า ที่การสูญเสียน้ำหนักที่เท่ากัน มอร์ตาร์ควบคุม W35 มีการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์มากที่สุด ในขณะที่การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (W35BBA45 และ W35MBA45) จะทำให้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ในการสูญเสียน้ำหนักช่วงต้นลดลง (ความชันของกราฟในช่วงต้นลดลง) แต่หลังจากนั้นความชันของกราฟ มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเล็กน้อยจนการหดตัวแบบแห้งขึ้นไปถึงใกล้เคียงกันเมื่อการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 7% (ค่าการหดตัวแบบแห้งประมาณ 800×10^{-6})

สำหรับกรณีที่ใช้เถ้าก้นเตาควบคุมคู่ไปกับเถ้าลอย (W35BFA30BBA45 และ W35MFA30MBA45) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ในการสูญเสียน้ำหนักช่วงต้นยังคงน้อยลงไป

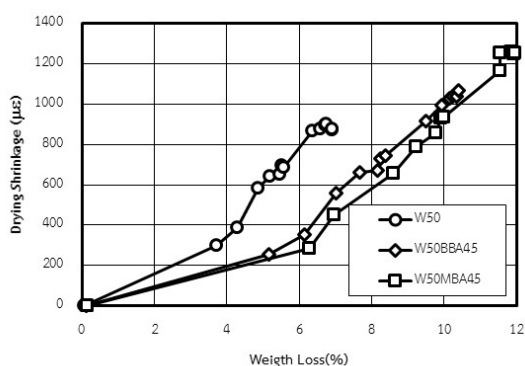
อีกและความชื้นของกราฟในช่วงหลังใกล้เคียง กับมอร์ตาร์ควบคุม (W35) ด้วย ซึ่งทำให้การหดตัวแบบแห้งยังคงน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึงแม้ว่าการสูญเสียน้ำหนักจะเพิ่มมากขึ้น

4.6.2 กรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

มอร์ตาร์ควบคุม W50 มีการหดตัวแบบแห้งน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตา (W50BBA45 และ W50MBA45) ดังแสดงในรูปที่ 19 ซึ่งคล้ายคลึงกับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และในกรณีนี้สามารถสังเกตได้ว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาจากลำปาง (W50MBA45) มีการหดตัวแบบแห้งมากกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาจากระยอง (W50BBA45) อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 19 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50

รูปที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่การสูญเสียน้ำหนักเท่ากัน มอร์ตาร์ที่เถ้าก้นเตา W50BBA45 และ W50MBA45 มีการหดตัวแบบแห้งน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม W50 ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35

5. สรุป

จากผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การผสมเถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในปริมาณสูงช่วยเพิ่มการไหลแผ่เริ่มต้น การไหลแผ่ที่ 2 ชั่วโมง ของมอร์ตาร์ และมีอัตราการสูญเสียการไหลแผ่ที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม
- 2) ในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาในปริมาณสูงมีระยะเวลาการก่อตัวใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม ส่วนกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 พบว่าเถ้าก้นเตาจากลำปางเพิ่มระยะเวลาก่อนตัวแต่เถ้าก้นเตาจากระยองไม่เพิ่มระยะเวลาก่อนตัว
- 3) การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 45 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดไม่ได้ส่งผลเสียต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตามีกำลังอัดแตกต่างจากมอร์ตาร์ควบคุมไม่เกินร้อยละ 12 ในทุกกรณีที่ไม่ได้มีการใส่เถ้าลอยผสมด้วย
- 4) ในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 การใช้เถ้าลอยควบคู่ไปกับเถ้าก้นเตาทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้นและการพัฒนากำลังอัดช่วงต้นช้าลงซึ่งสอดคล้องกับผลของเถ้าลอยในมอร์ตาร์และคอนกรีตโดยทั่วไป
- 5) มอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงส่งผลให้การหดตัวแบบอโตจีนี้น้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมอย่างเห็นได้ชัด แต่ก็เพิ่มการหดตัวแบบแห้งด้วยเช่นเดียวกัน และพบว่าการผสมเถ้าก้นเตาในปริมาณสูงทำให้การหดตัวโดยรวมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 การใช้เถ้าลอยร่วมกับเถ้าก้นเตาสามารถช่วยให้การหดตัวโดยรวมน้อยลงมาใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. เลขที่ CE-KMUTT 5904 และได้รับการสนับสนุนวัสดุสำหรับการทดสอบจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง และโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement, Pozzolan and Concrete", 6thed., Thailand Concrete Association, Bangkok, 381 p, 2010.(in Thai)
- [2] S. Tongaroonsri, S. Hemavibool, P. Choktaweekarn, and S. Tangtermsirikul, "Effect of bottom ash on autogenous shrinkage of binary binder", *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol.3, pp.1-8. 2015. (in Thai)
- [3] A. Duran-Herrera, P. Claude-Aitcin, and N. Petrov, "Effect of saturated lightweight sand substitution on shrinkage in 0.35 w/b concrete", *ACI Material Journal*, Vol. 104, No. 1, pp. 48-52, 2007.
- [4] Y. Bai, F. Darcy, P.A.M. Basheer, "Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp. 691-697, 2005.
- [5] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C128-15, Standard test method for relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, 2015.
- [6] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C1761/C1761M-15, Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete, 2015.
- [7] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C230/C230M-14, Standard Specification for Flow Table for Use in Test of Hydraulic Cement, 2014
- [8] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C807-3, Standard Test Method for Time of Setting of

hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle, 2013.

- [9] *American Society for Testing and Materials*, ASTM C109/C109M-13, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2013.
- [10] S. Jaichuay, S. Hemavibool, S. Tongaroonsri, P. Choktaweekarn, and S. Tangtermsirikul, "Effect of water retainability of bottom ash on shrinkage of concrete", *Annual Concrete Conference 8*, pp. 225-230, 2007. (in Thai)
- [11] T. Srichan, K. Hussain, P. Choktaweekarn, S. Tangtermsirikul, and B. Chatveera, "The influence of curing on compressive strength of concrete and autogenous shrinkage of mortar with different binders" *Annual Concrete Conference 6*, pp. 371-376, 2010. (in Thai)
- [12] A. Nawaz, P. Julnipitawong, P. Krammart, and S. Tangtermsirikul, "Effect and limitation of lime content in cement-fly ash mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol.102, Part 1, pp. 515-530, 2016.
- [13] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, and S. Chutubtim, "A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials", *Cement and Concrete Composites*, Vol.23(4), pp. 335-343, 2001.
- [14] N. Ghafoori and J. Bucholc, "Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.2, pp. 90-101, 1997.