

ผลของการใช้เถ้าก้นเตาในการลดการหดตัวของคอนกรีต Effect of Bottom ASH on Shrinkage Reduction of Concrete

สุพัฒนชัย ใจช่วย¹, สรรณกร เหมะวิบูลย์^{2*}, สนธยา ทองอรุณศรี³, สมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล⁴

S. Jaichuay, S. Hemavibool, S. Tongaroonsriand S. Tangtermsirikul

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

^{2*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³อาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

^{1,2}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

³Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna (Tak Campus),

⁴Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn

International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University

E-mail: sontaya@rmutl.ac.th, somnuk@siit.tu.ac.th

*Corresponding author E-Mail: saranagonh@nu.ac.th

(Received: August 21, 2018, Revised: November 27, 2018, Accepted: April 10, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้เถ้าก้นเตาจาก 2 แหล่งในประเทศไทยที่ไม่ผ่านการบดในการเป็นวัสดุป้อนภายในที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต งานวิจัยนี้ใช้เถ้าก้นเตา 3 ชนิด ที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำแตกต่างกัน ประกอบด้วย BAH BAB และ BAMB โดยมีร้อยละการกักเก็บน้ำเท่ากับ 18.8 21.1 และ 29.6 ตามลำดับ เถ้าก้นเตาถูกใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสำหรับส่วนผสมคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.35 และ 0.55 จากผลการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุป้อนภายในสามารถช่วยลดค่าการหดตัวทั้งแบบออโตจีนัสและแบบโดยรวมค่าการหดตัวมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงจะมีการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ

คำสำคัญ : การหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวแบบโดยรวม เถ้าก้นเตา ความสามารถในการกักเก็บน้ำ การบ่มภายใน

Abstract

This research was aimed to study the effect of the nonground bottom ash (BA) obtained from 2 different sources in Thailand, as an internal curing material on autogenous and total shrinkage behavior of concrete Three types of bottom ash having different water retainability, i.e. BAH, BAB and BAMB were used in this study and the percentages of water retainability of these bottom ashes were 18.8, 21.1 and 29.6, respectively The percentages of replacement of natural fine aggregate with these bottom ashes were 10 and 30% by volume of fine aggregate and the water to cement ratios of concrete mixtures used in this study were 0.35 and 0.55 The results showed that the use of saturated nonground bottom ashes in concrete mixtures as the internal curing material can reduce both autogenous and total shrinkage of concrete. The shrinkage of concrete reduces with the increase of the bottom ash content. The mixtures with higher water retainability bottom ash had lower shrinkage.

Keywords: Autogenous shrinkage, Total shrinkage, Bottom ash, Water retainability, Internal curing

1. บทนำ

การผสมวัสดุที่มีความพรุนสูงในคอนกรีตที่มีค่า w/b ต่ำมาก ได้แก่ คอนกรีตสมรรถนะสูง เพื่อใช้ในการลดการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวและช่วยในการบ่มคอนกรีตเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันใช้ในต่างประเทศ [1] โดยทั่วไปวัสดุดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่าวัสดุบ่มภายใน วัสดุบ่มภายในเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงและโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุบ่มภายในที่เป็นมวลรวมเบาที่มีความพรุนสูง และวัสดุบ่มภายในที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น โพลีเมอร์ที่มีการดูดซึมน้ำสูง วัสดุทั้งสองประเภทมีสมบัติในการกักเก็บกักน้ำได้ดี น้ำที่กักเก็บอยู่ภายในจะค่อยๆถูกดึงมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายหลังคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แม้ไม่มีการบ่มน้ำจากภายนอกก็ตาม ทำให้ลดปัญหาการบ่มคอนกรีตที่ไม่เพียงพอ

เถ้าก้นเตาเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับเถ้าลอย สมบัติของวัสดุทั้งสองขึ้นอยู่กับกระบวนการเผาและสมบัติของถ่านหินที่นำมาเผา เถ้าลอยมีความละเอียดสูงแต่เถ้าก้นเตามีอนุภาคขนาดใหญ่ เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดมีสมบัติความเป็นสารปอซโซลานต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์อย่างไรก็ตามเนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในการแทนที่ทรายบางส่วนเพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุบ่มภายใน [2-4] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้มวลรวมเบาที่มีความพรุนสูงเป็นวัสดุบ่มภายใน สามารถลดการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีต [3,4] ในกรณีที่ควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์และค่าการยุบตัวให้ใกล้เคียงกัน การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 30 ไม่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงมากนัก แต่หากแทนที่มากกว่าร้อยละ 30 จะทำให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าก้นเตาทำให้การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมีค่าลดลง โดยการหดตัวลดลงตามการแทนที่ของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น [5,6] ขนาดของเถ้าก้นเตาที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพของการบ่มภายในการใช้เถ้าก้นเตาที่มีขนาดเล็กให้ผลที่ดีกว่ากรณีที่ใช้เถ้าก้นเตาที่มีขนาดใหญ่ [7] ปัจจุบันมีการศึกษาการนำเถ้าก้นเตามาใช้ลดปัญหาการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ แต่สำหรับในประเทศไทยยังมีการศึกษาในประเด็นดังกล่าวนี้ไม่มากนักจึงทำให้ยังไม่พบการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในการก่อสร้างอย่างแพร่หลายภายในประเทศ นอกจากนี้ประสิทธิภาพหรือความสามารถในการเป็นวัสดุบ่มภายในของเถ้าก้นเตาจากแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ สภาพที่ใช้ในการเผา ประเภท และคุณภาพของถ่านหินที่นำมาเผา โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้าน

การกักเก็บน้ำ และลักษณะโครงสร้างรูพรุน (Pore structure) ของเถ้าก้นเตา ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในการเป็นวัสดุบ่มภายใน

ปัจจุบันแหล่งของเถ้าก้นเตาที่สำคัญของประเทศมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง ซึ่งโรงไฟฟ้าทั้งสองแห่งใช้ถ่านหินแตกต่างกันจึงทำให้สมบัติของเถ้าก้นเตาที่ได้มีความแตกต่างกัน ดังนั้นความสามารถในการเป็นวัสดุบ่มภายในและประสิทธิภาพในการลดการหดตัวของคอนกรีตจึงมีความแตกต่างกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าทั้งสองแหล่งในการลดการหดตัวแบบบอโตจีนัส และการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีตเพื่อใช้เป็นแนวทางในการใช้เถ้าก้นเตาในงานคอนกรีตภายในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสมต่อไป

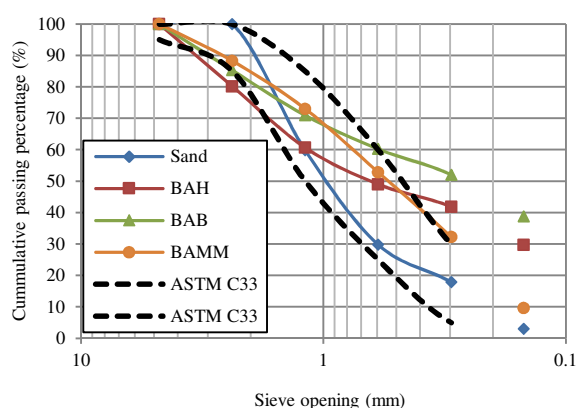
2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และมีองค์ประกอบทางเคมีดังที่แสดงในตารางที่ 1

2.2 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ประกอบด้วยมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด โดยมวลรวมหยาบที่ใช้คือหินปูนที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 มีขนาดโตสุดเท่ากับ 19 มิลลิเมตร และมีการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.55 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ และเถ้าก้นเตา ทรายแม่น้ำที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58 และมีการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.78 เถ้าก้นเตาที่ใช้ในการศึกษาได้มาจาก 2 แหล่ง คือ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (BAMM) เป็นเถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์มีการกักเก็บน้ำค่อนข้างสูงโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 29.6 สำหรับเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้า BLCP ที่ใช้ในการศึกษามีสองชนิดซึ่งได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัสที่ได้จากแหล่งที่แตกต่างกันโดยจะเรียกว่า BAH และ BAB มีค่าร้อยละการกักเก็บน้ำเท่ากับ 18.8 และ 21.1 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะพื้นผิวของเถ้าก้นเตา แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาในงานวิจัยนี้ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri และ Tangtermsirikul [8] เถ้าก้นเตาที่ใช้จะนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการกักเก็บน้ำที่ทดสอบไว้ ดังตารางที่ 2 แล้วเก็บในภาชนะที่มิดชิด เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของเถ้าก้นเตา ก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต



รูปที่ 1 การกระจายขนาดผลของทรายและเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตา

Chemical Composition, %	OPC	BAH	BAB	BMM
SiO ₂	19.87	73.15	71.67	47.45
Al ₂ O ₃	4.87	18.34	21.76	20.32
Fe ₂ O ₃	3.55	4.15	3.35	10.92
CaO	65.03	1.35	0.70	13.16
MgO	2.52	0.65	0.41	2.60
SO ₃	0.73	0.04	0.03	1.16
Na ₂ O	0.02	0.21	0.15	1.03
K ₂ O	0.45	1.00	0.65	2.70
TiO ₂	0.26	0.89	1.14	0.41
P ₂ O ₅	0.07	0.19	0.13	0.16
LOI (%)	2.26	2.95	0.59	3.11

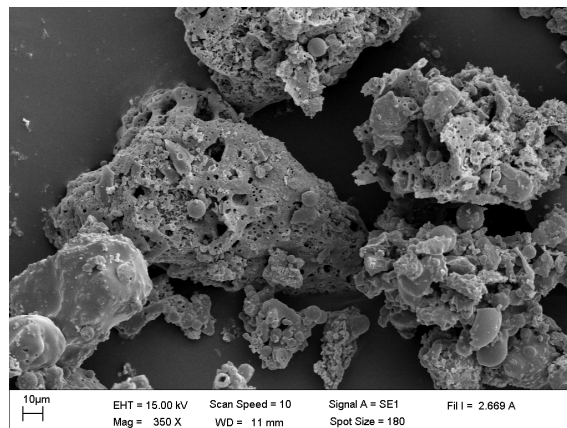
3.ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

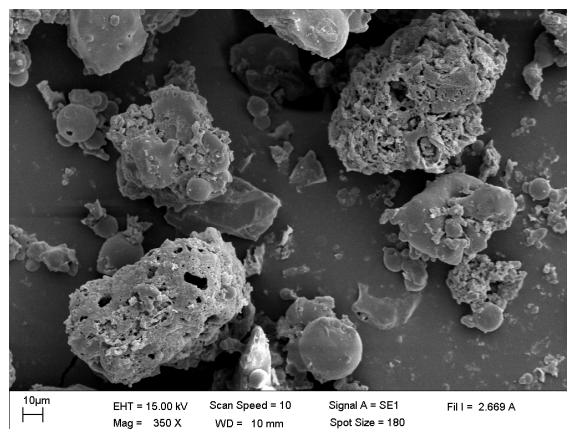
ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษามีทั้งสิ้น 12 ส่วนผสม ดังตารางที่ 3 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 สำหรับศึกษาการหดตัวแบบบอโตจีนัส และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 สำหรับศึกษาการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด อัตราส่วนระหว่างทรายต่อมวลรวมทั้งหมด (S/A) เท่ากับ 0.42 ค่าการยุบตัวของทุกส่วนผสมคอนกรีตถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 10±2.5 เซนติเมตร โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ ประเภท F (Superplasticizer) ตามมาตรฐาน ASTM C494 และเป็นชนิด Polycarboxylate base

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตา

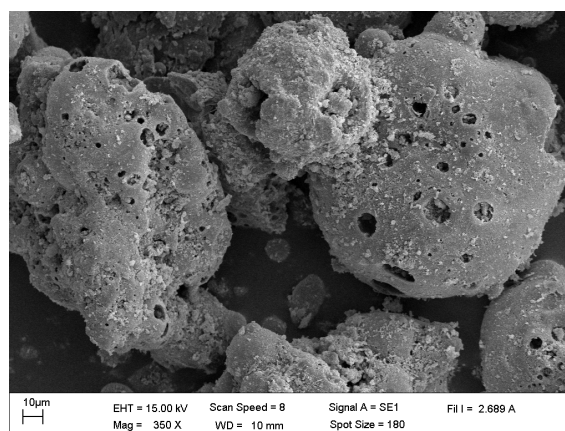
Physical properties	BAH	BAB	BMM
Specific Gravity	2.03	2.35	2.64
Fineness modulus	2.39	1.93	2.44
Water Retainability (%)	18.80	21.10	29.6



(ก) BAH



(ข) BAB



(ค) BMM

รูปที่ 2 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าก้นเตา (350X)

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมคอนกรีต

No.	Mix notation	w/b	BA (%)	Type of BA	sp (%)	Slump (cm)
1	w35BA0	35	0	-	1.6	9.5
2	w35BAH10	35	10	H	1.5	7.5
3	w35BAB10	35	10	B	1.5	9.5
4	w35BAMM10	35	10	MM	1.5	10.5
5	w35BAH30	35	30	H	1.0	10.0
6	w35BAMM30	35	30	MM	1.0	12.5
7	w55BA0	55	10	-	-	10.5
8	w55BAH10	55	10	H	-	7.5
9	w55BAB10	55	10	B	-	8.5
10	w55BAMM10	55	10	MM	-	10.0
11	w55BAH30	55	30	H	-	9.5
12	w55BAMM30	55	30	MM	-	13.5

หมายเหตุ : w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, BA คือ ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา, sp คือ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต

ระยะเวลาก่อตัวมีความสัมพันธ์กับการเริ่มเกิดหน่วยแรงในโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกยึดรั้ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาผลของการใช้เถ้าก้นเตาต่อระยะเวลาก่อตัว นอกจากนี้ยังใช้ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายในการกำหนดระยะเวลาเริ่มต้นการวัดการหดตัวแบบบอโตจีนิสของคอนกรีต การทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการก่อตัวมีขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ใช้จำนวน 2 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.2.2 การหดตัวแบบบอโตจีนิสของคอนกรีต

การทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนิสดำเนินการเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยวัดค่าการหดตัวของแท่งคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมจะใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยนี้เริ่มวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่าง เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2 ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ทั้งนี้เพื่อให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดออกจากแบบโดยไม่เกิดความเสียหาย การหดตัวแบบบอโตจีนิสเป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องมีการห่อหุ้มแท่งตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร 2 ชั้นตามด้วย พลาสติกใส 5 ชั้นและเทปกาวใส 2 ชั้นทำการวัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่ามีน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสียน้ำหนักต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น ตลอดการทดสอบแท่ง

ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$

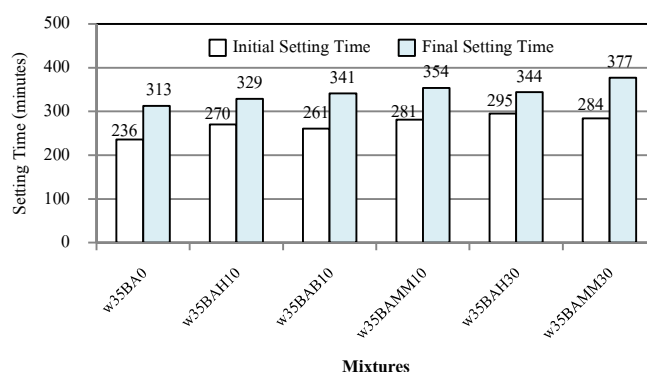
3.2.3 การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

ทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน แล้วบ่มในน้ำจนมีอายุครบ 7 วัน จากนั้นนำมาเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง ทั้งในช่วงที่บ่มในน้ำและหลังจากขึ้นจากน้ำ

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต

ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตามีระยะเวลาก่อตัวนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตา และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาก่อตัวนานกว่าเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้เถ้าก้นเตาทำให้มีปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นหรือการใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น [9]



รูปที่ 3 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต (w/b = 0.35)

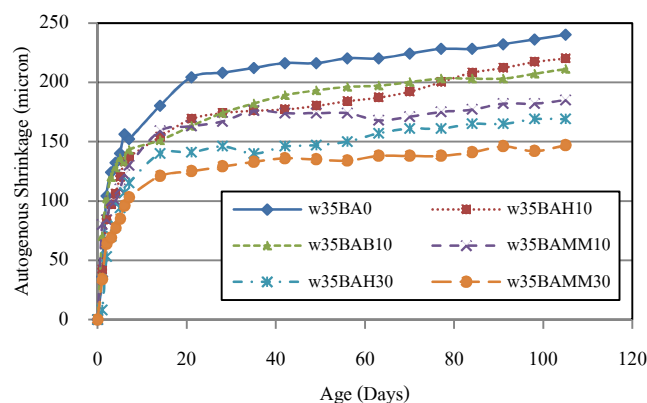
4.2 การหดตัวแบบบอโตจีนิสของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงพฤติกรรมการหดตัวแบบบอโตจีนิสของแท่งทดสอบคอนกรีตที่มี w/b เท่ากับ 0.35 กรณีส่วนผสมคอนกรีตที่มีการใช้เถ้าก้นเตา 3 ชนิด (BAH BAB และ BAMM) ในการแทนที่ทรายบางส่วน จากผลการทดสอบพบว่าการใช้เถ้าก้นเตาจากทั้งสองแหล่งในส่วนผสมคอนกรีตสามารถช่วยลดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนิสได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการลดค่าการหดตัวของเถ้าก้นเตาแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

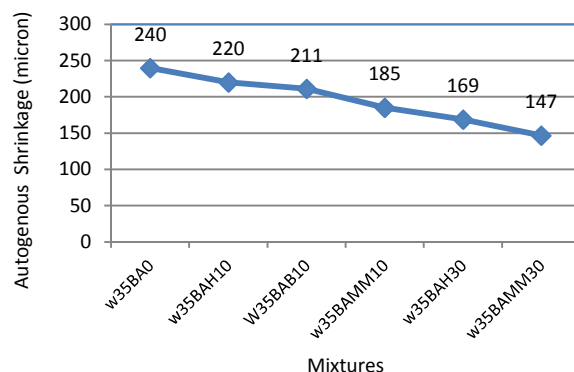
กรณีที่มีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่เท่ากัน ผลการทดสอบพบว่าเถ้าก้นเตาชนิด BAMB มีความสามารถในการลดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนส์สูงที่สุด สำหรับส่วนผสมที่ใช้เถ้าก้นเตาชนิด BAB และ BAH มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณของเถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีตจากกรณีที่แทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 มีผลทำให้ค่าการหดตัวแบบบอโตจีนส์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ รูปที่ 5 แสดงผลของการใช้เถ้าก้นเตาที่มีต่อค่าการหดตัวในระยะยาว (Long term shrinkage) ของคอนกรีตโดยเป็นค่าการหดตัวที่ระยะเวลา 105 วัน สำหรับทั้ง 6 ส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลการการใช้เถ้าก้นเตาแต่ละชนิดในการลดการหดตัวแบบบอโตจีนส์ โดยถ้าเรียงลำดับความสามารถของเถ้าก้นเตาในการลดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนส์โดยเรียงจากมากไปหาน้อยได้คือ BAMB BAB และ BAH ตามลำดับ

การหดตัวแบบบอโตจีนส์เกิดจากการสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลารีเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว ดังนั้นการลดการสูญเสียน้ำอิสระภายในคอนกรีตจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ทำให้การหดตัวมีค่าลดลง การใช้เถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำในรูปพูนได้สูงในส่วนผสมคอนกรีตเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดค่าการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีต ดังนั้น เมื่อเกิดการสูญเสียความชื้นภายในช่องว่างคาปิลารีน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ภายในเถ้าก้นเตาจะค่อยๆ เคลื่อนตัวออกจากเถ้าก้นเตาเพื่อชดเชยความชื้นที่สูญเสียไปทำให้ Capillary Suction ที่เกิดขึ้นในช่องว่างคาปิลารีมีค่าลดลงพฤติกรรมดังกล่าวนี้เรียกว่าการบ่มภายใน (Internal curing) ดังนั้น ถ้าพิจารณาผลการทดสอบที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่าเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (BAMB) มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 29.6 ดังนั้น จึงทำให้สามารถปลดปล่อยน้ำออกมาได้มากและยาวนานกว่าเถ้าก้นเตาชนิด BAB และ BAH ที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำกว่า ดังนั้น จึงทำให้ค่าการหดตัวแบบบอโตจีนส์มีค่าน้อยที่สุด ผลของปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในเถ้าก้นเตาสำหรับการบ่มภายใน (คำนวณจากค่าร้อยละการกักเก็บน้ำและปริมาณของเถ้าก้นเตาที่ใช้ในแต่ละส่วนผสม) ต่อพฤติกรรมการหดตัวแบบบอโตจีนส์ของคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ผสมเถ้าก้นเตาการเพิ่มปริมาณน้ำสำหรับการบ่มภายในโดยการเพิ่มปริมาณของเถ้าก้นเตาชนิด BAH และ BAMB สามารถช่วยลดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนส์ลงได้ การใช้เถ้าก้นเตาชนิด BAH แทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 สามารถลดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนส์ลงได้ร้อยละ 8.33 และ 29.6 ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ใช้เถ้าก้นเตาชนิด BAMB แทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 ค่าการหดตัวแบบบอโต

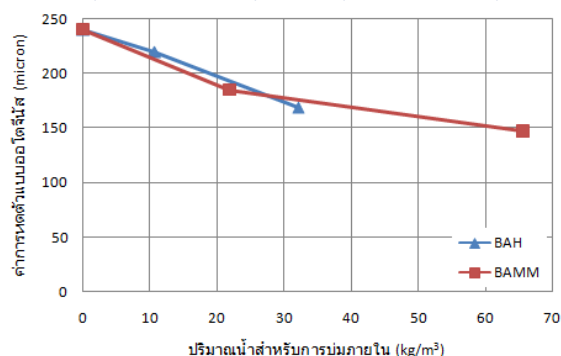
จีนส์มีค่าลดลงร้อยละ 22.9 และ 38.8 ตามลำดับถ้าทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการหดตัวแบบบอโตจีนส์พบว่าเถ้าก้นเตาชนิด BAMB มีประสิทธิภาพสูงกว่าชนิด BAH ดังนั้น ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อประสิทธิภาพในการลดการหดตัว



รูปที่ 4 การหดตัวแบบบอโตจีนส์ของคอนกรีตที่มี $w/b = 0.35$ และเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30



รูปที่ 5 ค่าการหดตัวแบบบอโตจีนส์ในระยะยาวสำหรับคอนกรีตกรณี $w/b=0.35$



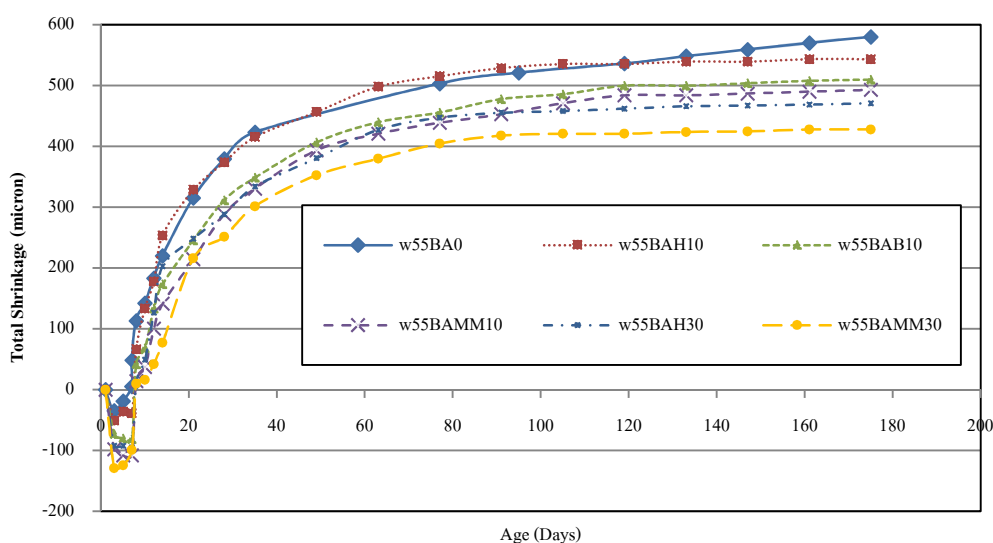
รูปที่ 6 การหดตัวแบบบอโตจีนส์ของคอนกรีตที่ 105 วัน ($w/b = 0.35$) สำหรับส่วนผสมที่ใช้เถ้าก้นเตาชนิด BAH และ BAMB

4.3 การหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต

ผลการทดสอบการหดตัวแบบโดยรวมของแท่งทดสอบคอนกรีตดังที่แสดงดังรูปที่ 7 พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาสามารถ

ช่วยลดการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต โดยค่าการหดตัวจะลดลงตามความสามารถในการกักเก็บน้ำและปริมาณของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่ใช้เถ้าก้นเตาชนิด BAH ซึ่งเป็นเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำที่สุด (ตารางที่ 2) ในการแทนที่มวลรวมละเอียดปริมาณร้อยละ 10 (W55BAH10) พบว่ามีค่าการหดตัวแบบโดยรวมใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุม โดยมีค่าการหดตัวในช่วงแรกมากกว่าส่วนผสมควบคุมเล็กน้อย และเริ่มมีค่าการหดตัวน้อยกว่าส่วนผสมควบคุมที่ระยะเวลาประมาณ 120 วัน ดังนั้น การใช้เถ้าก้นเตาเพื่อลดการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ภายในเถ้าก้นเตาโดยต้องมีปริมาณที่เหมาะสมและเพียงพอ

นอกจากนี้ ในช่วง 7 วันแรกซึ่งเป็นช่วงของการบ่มคอนกรีตในน้ำ ผลการทดสอบพบว่าแท่งทดสอบมีการขยายตัวในทุกส่วนผสมโดยที่ค่าการขยายตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าก้นเตาและค่าการกักเก็บน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการขยายตัวดังกล่าวนี้จะชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นภายหลังเมื่อแท่งทดสอบเริ่มมีการสูญเสียความชื้นไปสู่สิ่งแวดล้อมและทำให้แท่งทดสอบมีการหดตัวแบบโดยรวมลดลง ดังนั้น การใช้เถ้าก้นเตาที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงในปริมาณมากจะช่วยลดการหดตัวแบบโดยรวมได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากเกินไปจะมีผลต่อสมบัติของคอนกรีตในด้านอื่น โดยเฉพาะกำลังอัดที่จะมีค่าลดลง



รูปที่ 7 การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่มี $w/b = 0.55$ และเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าก้นเตาจาก 2 แหล่งที่สำคัญของประเทศไทยในการลดการหดตัวทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมของคอนกรีต โดยเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการศึกษาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกัน ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีตมีผลต่อระยะเวลาก่อตัว โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาจะมีระยะเวลาก่อตัวนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตา และระยะเวลาก่อตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การผสมเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงจะทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาก่อตัวนานกว่ากรณีที่ใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำในส่วนผสม

2) คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาเกิดการขยายตัวในช่วงของการบ่มในน้ำ (ดูรูปที่ 7) และการขยายตัวนี้มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าการกักเก็บน้ำและปริมาณของเถ้าก้นเตาในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น

3) การใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีตสามารถลดการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวม โดยการหดตัวทั้งสองแบบมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม

4) ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำที่สูงกว่าจะมีค่าการหดตัวทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมต่ำกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำกว่า

5) ค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนกับปริมาณน้ำสำหรับการบ่มภายในที่เพิ่มขึ้น การผสมเถ้าก้นเตาในปริมาณที่เหมาะสมสามารถป้องกันการหดตัวแบบบอโตจีนัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์จำกัด บริษัทบางจากปิโตรเลียมจำกัด และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bentz D. P. and Snyder K. A. (1999). Protected paste volume in concrete – Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. Cement and Concrete Research, 29, 1863-1867.
- [2] Bai Y., Darcy F. and Basheer P. A. M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. Construction and Building Materials, 19, 691-697.
- [3] Durán - Herrera A., Claude - Aïtcin P., and Petrov N. (2007). Effect of Saturated Lightweight Sand Substitution on Shrinkage in 0.35 w/b Concrete. ACI Material Journal, No.104, M06.
- [4] Cusson D. and Hoogveen T.(2008). Internal curing of high-performance concrete with pre soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Research, 38, 757-765.
- [5] Shi-Cong K. and Chi-Sun P. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. Construction and Building Materials, 2, 2877-2886.
- [6] Andrade L. B., Rocha J. C. and Cheriaf M. (2009). Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. Construction and Building Materials, 23, 609-614.
- [7] Zhutovsky S., Kovler K. and Bentur A. (2011). Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes, Cement and Concrete Research, 41, 981-986.
- [8] Kasemchaisiri R. and Tangtermsirikul S. (2007). A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. Construction and Building Materials, 21, 1322-1334.
- [9] Ghafoori N. and Bucholc J. (1997). Properties of high-calcium dry bottom ash concrete. ACI Materials Journal, 94, 2, 90-101.