วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผลของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดต่อสมบัติด้านกำลังของคอนกรีต

Effect of Bottom Ash as Fine Aggregate on Strength of Concrete

นัฐภรณ์ ดีสูงเนิน[1] รวิสรา แก้ววิเชียร[2] ศรันยู หทัยพิชิตชัย[3]
สรัณกร เหมะวิบูลย์[4] สนธยา ทองอรุณศรี[5*] และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล[6]

[1,2,3]นักศึกษา [5]อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดตาก 63000
[4]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000
[6]ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิริธร จังหวัดปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและไม่ผสมเถ้าลอย ต่อกำลังของคอนกรีตที่บ่มน้ำและไม่บ่ม กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.55 สำหรับศึกษาในคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตกำลังปกติ ตามลำดับ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 0, 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด จากผลการทดลองพบว่า การใช้เถ้าก้นเตาทำให้ค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น แต่คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าดัชนีวัดผลการบ่ม พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยต้องการระยะเวลาการบ่มน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับคอนกรีตกำลังอัดสูงเมื่อใช้เถ้าก้นเตาเป็นส่วนผสม จะทำให้ความต้องการระยะเวลาในการบ่มน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลดลง

Abstract

This research was aimed to study the effect of bottom ash (BA), as fine aggregate in fly ash concrete and cement-only concrete, on strength of water-cured and uncured concrete. The water to binder ratios were 0.35 and 0.55 to represent high strength and normal strength concrete, respectively. The weight percentages of replacement of cement by fly ash were 0 and 30%. The replacement ratios of bottom ash as fine aggregate were 0, 10 and 30% by volume of fine aggregate. The results indicated that the slump and setting time of concrete increased with the increase of bottom ash content. In contrast, the compressive and tensile strength decreased with the increase of bottom ash content. From the curing sensitivity index, it was showed that the fly ash concrete required longer curing period than cement-only concrete. In case of high strength concrete, the use of bottom ash in fly ash concrete can reduce curing sensitivity of concrete

คำสำคัญ : เถ้าลอย เถ้าก้นเตา กำลังอัด การบ่ม ดัชนีวัดผลการบ่ม
Keywords : Fly ash, Bottom ash, Compressive strength, Curing, Curing sensitivity index

[*]*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ sontaya@rmutl.ac.th โทร. 08 9635 3425*

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเถ้าลอยช่วยลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตและทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น เช่น กำลังอัดในระยะยาว เพิ่มค่าการยุบตัวของคอนกรีต และลดการหดตัวของคอนกรีต อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบสำหรับการใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยคือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยต้องการระยะเวลาในการบ่มมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และต้องบ่มคอนกรีตให้นานขึ้นเมื่อมีการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งหากคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไม่ได้รับการบ่มที่เหมาะสม จะทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตไม่ดีเท่าที่ควร แม้ว่ามาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2546) มีข้อกำหนดให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณมาก หรือสำหรับคอนกรีตที่ใช้แร่ผสมเพิ่มอื่น ต้องมีระยะเวลาการบ่มคอนกรีตไม่น้อยกว่า 14 วัน แต่ในปัจจุบันพบว่าในงานก่อสร้างทั่วไปนั้น มักไม่ให้ความสำคัญกับการบ่มคอนกรีตเท่าที่ควร เช่น ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตสั้นเกินไป ใช้วิธีการบ่มไม่เหมาะสม นอกจากนี้ในโครงสร้างที่ใช้คอนกรีตกำลังสูง ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีความหนาแน่นสูง น้ำจากการบ่มไม่สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างเต็มที่ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นได้น้อย ในขณะที่โครงสร้างที่ใช้คอนกรีตกำลังปกติ ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ แต่หากโครงสร้างมีความหนามาก เช่น ฐานรากขนาดใหญ่ น้ำจากการบ่มก็ไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปถึงภายในของโครงสร้างได้เช่นกัน (ธีรติ ศรีจันทร์ และคณะ, 2553) ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุมวลเบาที่มีความพรุนและสามารถเก็บน้ำไว้ภายใน มาใช้ในรูปแบบของวัสดุบ่มภายใน (Bai, Y., Darcy, F. and Basheer, P.A.M., 2005) เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการบ่มคอนกรีต นอกจากนี้การใช้วัสดุบ่มภายในยังช่วยลดปัญหาด้านการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย (Herrera, A.D., Aïtcin, P. C. and Petrov, N., 2007; Cusson, D. and Hoogeveen, T., 2008) ปัจจุบันประเทศไทยมีเถ้าก้นเตา ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการนำถ่านหินลิกไนต์มาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง มีความสามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในได้ดี และมีขนาดใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด งานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในรูปของวัสดุบ่มภายใน (Internal curing material) โดยนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียด สำหรับแทนที่ทราย เพื่อให้น้ำที่กักเก็บอยู่ในเถ้าก้นเตาถูกดึงมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นภายหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยศึกษาผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย ศึกษาค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต รวมถึงศึกษาดัชนีวัดผลต่อการบ่ม (Curing sensitivity index, CSI)

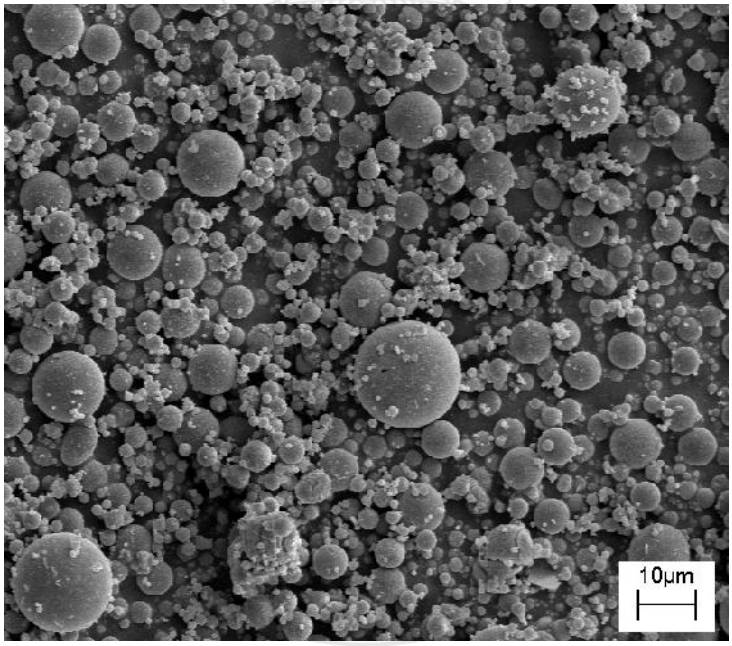
1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1.1.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.13 และเถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.28 ลักษณะรูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่ามีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและมีหลายขนาดปะปนกัน องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานและเถ้าก้นเตา

Chemical Composition (%)	OPC	Fly ash	Bottom ash
SiO_2	19.87	39.40	47.45
Al_2O_3	4.87	17.93	20.32
Fe_2O_3	3.55	12.92	10.92
CaO	65.03	19.19	13.16
MgO	2.52	2.99	2.60
SO_3	0.73	3.03	1.16
Na_2O	0.02	1.36	1.03
K_2O	0.45	2.50	2.70
TiO_2	0.26	0.34	0.41
P_2O_5	0.07	0.20	0.16
LOI	2.26	0.17	3.11
Free CaO	0.20	1.60	-



รูปที่ 1 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าลอย (500X)

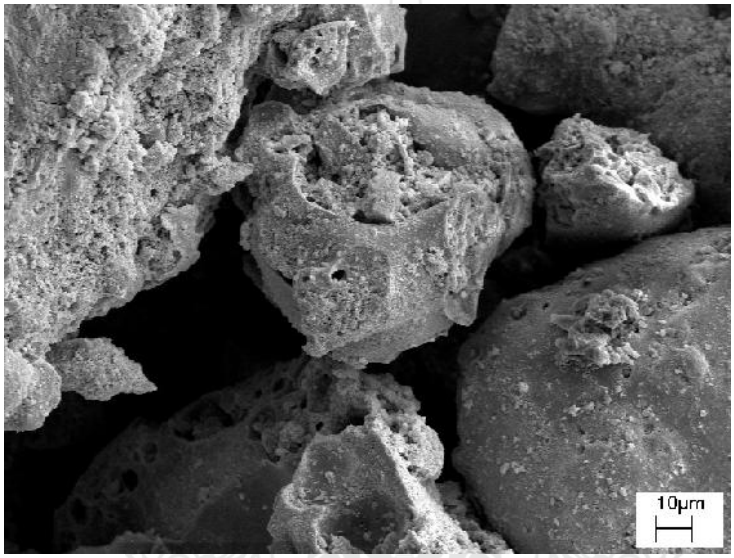
1.1.2 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ประกอบด้วยมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ สมบัติทางกายภาพของมวลรวม แสดงดังตารางที่ 2 มวลรวมหยาบที่ใช้ ได้แก่ หินปูนย่อย มีขนาดโตสุดของหินเท่ากับ 19 มิลลิเมตร มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายแม่น้ำ และเถ้าก้นเตา โดยเถ้าก้นเตาที่ใช้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาแสดงดังตารางที่ 1 ลักษณะอนุภาคของเถ้าก้นเตาแสดงดังรูปที่ 2 ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri, R. and Tangtermsirikul, S., 2007 ซึ่งได้ค่าร้อยละการกักเก็บน้ำเท่ากับ 29.5 ขนาดคละของทรายและเถ้าก้นเตาแสดงดังรูปที่ 3 เถ้าก้นเตาที่ใช้จะนำมา

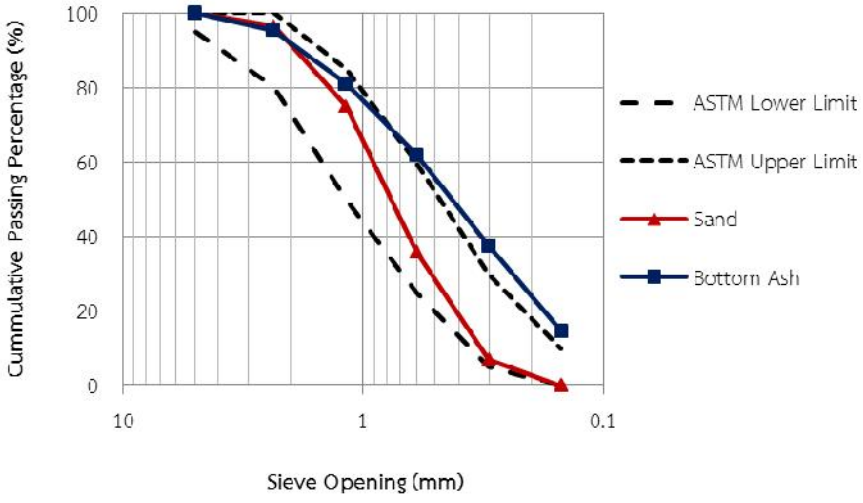
ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาแล้วเก็บในภาชนะที่มิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวม

Physical Properties	Crushed Limestone	Sand	Bottom Ash
Specific Gravity	2.68	2.58	1.92
Water Absorption (%)	0.72	0.94	-
Water Retainability(%)	-	-	29.51



รูปที่ 2 ภาพกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าก้นเตา (350X)



รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของทรายและเถ้าก้นเตา

2. วิธีการทดลอง

2.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณเถ้าก้นเตา และระยะเวลาการบ่มคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 สำหรับศึกษาในคอนกรีตกำลังสูง และ 0.55 สำหรับศึกษาในคอนกรีตกำลังปกติ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับ 0, 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษามีทั้งสิ้น 11 ส่วนผสม ดังตารางที่ 3 คอนกรีตกำลังสูง (w/c=0.35) มีความสามารถเทได้ต่ำมาก จึงควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตกำลังสูงให้อยู่ในช่วง 10 ± 2.5 เซนติเมตร โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 ซึ่งสารลดน้ำพิเศษที่ใช้มีสารประกอบหลักเป็นแนพทาลีนซัลโฟนิก

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมคอนกรีต

No.	Mix notation	w/b	FA (%)	BA (%)	sp (%)	Slump (cm)
1	w35r0BA0	0.35	0	0	0.8	10.8
2	w35r0BA10	0.35	0	10	0.8	9.3
3	w35r0BA30	0.35	0	30	0.7	10.5
4	w35r30BA0	0.35	30	0	0.4	8.0
5	w35r30BA10	0.35	30	10	0.4	11.5
6	W55r0BA0	0.55	0	0	-	13.3
7	w55r0BA10	0.55	0	10	-	14.3
8	w55r0BA30	0.55	0	30	-	16.3
9	w55r30BA0	0.55	30	0	-	18.0
10	w55r30BA10	0.55	30	10	-	18.5
11	w55r30BA30	0.55	30	30	-	20.5

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

2.2 วิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเถ้าก้นเตาต่อสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบกำลังอัด รวมถึงคุณสมบัติในช่วงคอนกรีตสด ได้แก่ ค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10x20 เซนติเมตร และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน การทดสอบในแต่ละอายุใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย การทดสอบค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 และ ASTM C403 ตามลำดับ การทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวแบ่งเป็น ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ของคอนกรีต ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบระยะเวลาก่อตัวมีขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมใช้จำนวน 2 ตัวอย่าง

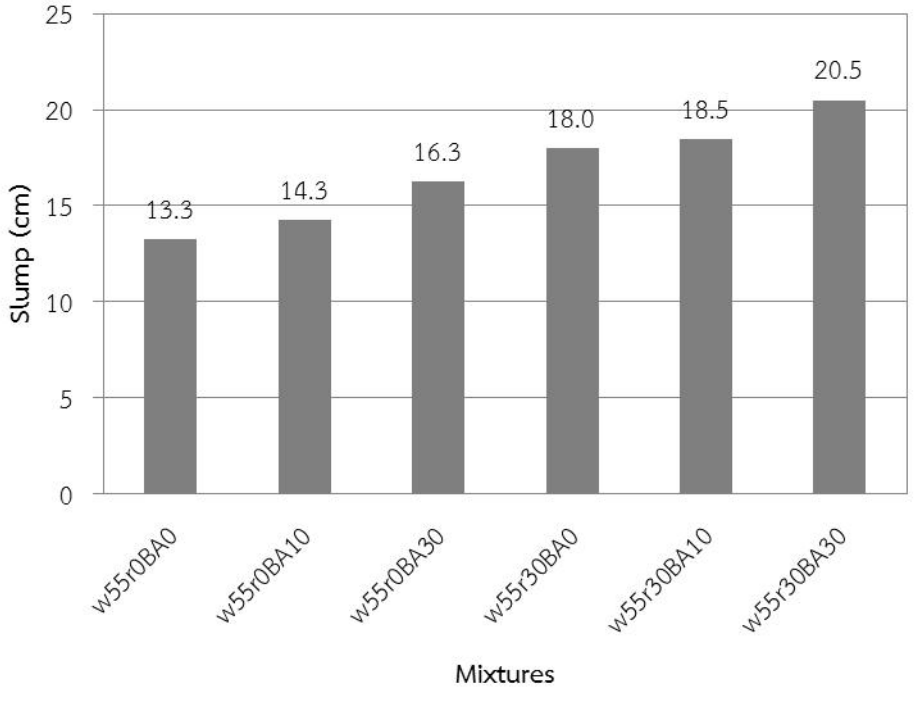
การศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าก้นเตาในการเป็นวัสดุบ่มภายใน แบ่งตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ไม่มีการบ่มคอนกรีต ตัวอย่างในกลุ่มนี้จะถูกเก็บไว้ในสภาพอากาศทั่วไปตั้งแต่แกะออกจากแบบเมื่อมีอายุครบ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งมีอายุครบกำหนดทดสอบ กลุ่มที่ 2 บ่มน้ำ 7 วัน ตัวอย่างในกลุ่มนี้หลังจากแกะ

ออกจากแบบจะถูกนำไปบ่มในน้ำจนตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน แล้วจึงนำขึ้นมาเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมเดียวกับตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 งานวิจัยนี้ใช้การบ่ม 7 วัน เป็นชุดควบคุม เพื่อให้ตัวอย่างมีสภาพเช่นเดียวกับการก่อสร้างจริงที่ส่วนใหญ่มีการบ่มเพียง 7 วัน แล้วปล่อยให้คอนกรีตสัมผัสกับอากาศ

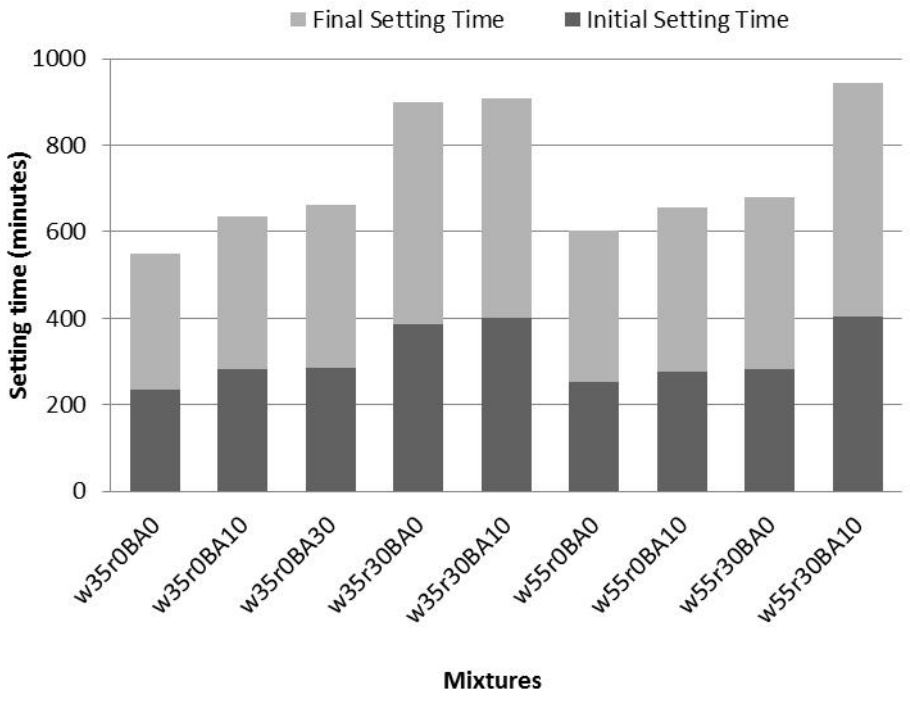
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 อิทธิพลของเถ้าก้นเตาต่อสมบัติของคอนกรีตสด

การศึกษาความสามารถเทได้พิจารณาจากส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ จากผลการทดสอบค่าการยุบตัวดังรูปที่ 4 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและไม่ผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง เมื่อเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ขณะที่ผสมคอนกรีต หินและทรายอาจเกิดการกระแทกกับเถ้าก้นเตา จนทำให้เถ้าก้นเตาที่มีความแข็งแรงต่ำแตกออกจากกัน ทำให้น้ำที่กักเก็บในเถ้าก้นเตาถูกปลดปล่อยออกมาขณะผสมคอนกรีต (สุพัฒน์ชัย ใจช่วย และคณะ, 2555) ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและไม่ผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการใช้เถ้าก้นเตาทำให้มีน้ำอิสระเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น และทำให้ค่า pH ของสารละลายลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น (Ghafoori, N. and Bucholc, J., 1997)



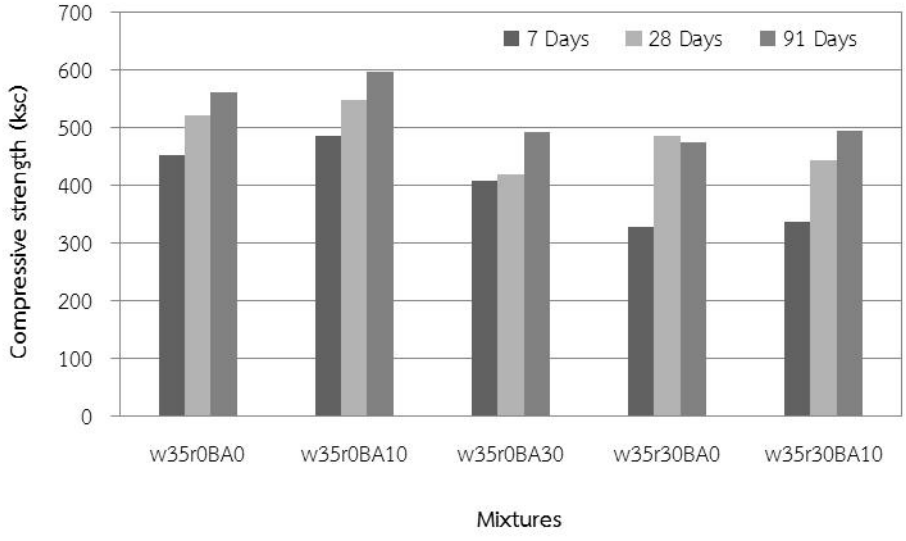
รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (w/b=0.55)



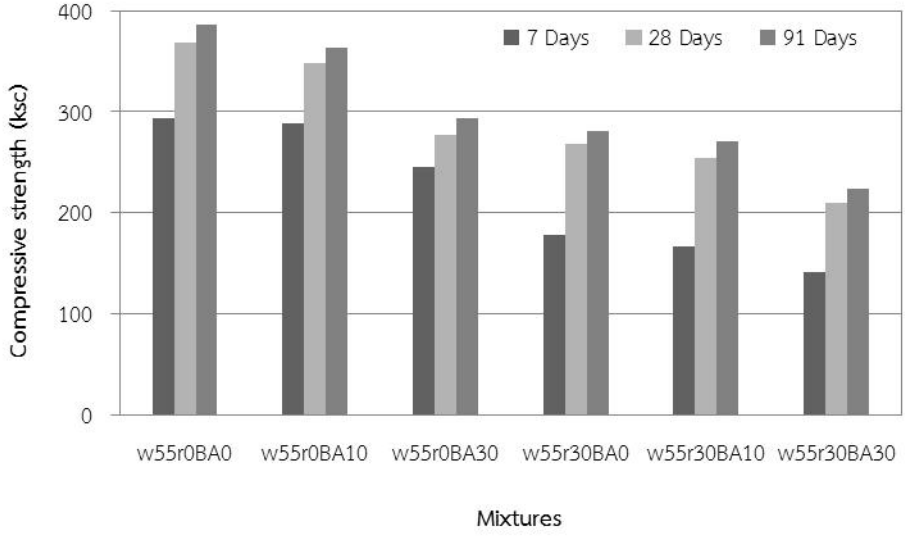
รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

3.2 อิทธิพลของปริมาณเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัด

จากผลการทดสอบกำลังอัด ดังรูปที่ 6 พบว่าในกรณีของคอนกรีตกำลังสูง (w/b=0.35) และใช้สารผสมเพิ่มในปริมาณที่เท่ากัน การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 ทั้งในคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอย มีกำลังอัดในระยะยาวมากกว่าส่วนผสมที่ไม่ใส่เถ้าก้นเตา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในกรณีของคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีเพสต์แข็งแรงมาก การใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณเพียงร้อยละ 10 มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังอัดในระยะยาวที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ยาวนานขึ้นจากน้ำที่ถูกกักเก็บในเถ้าก้นเตา มากกว่าผลเสียที่เกิดจากความแข็งแรงของเถ้าก้นเตาที่ต่ำกว่าทราย แต่เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 พบว่าในกรณีของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 91 วัน ลดลงประมาณร้อยละ 12.00 ส่วนผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังอัดปกติ (w/b=0.55) ดังรูปที่ 7 พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น โดยการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ทำให้กำลังอัดลดลงร้อยละ 5.69 และ 3.75 สำหรับคอนกรีตที่ไม่ผสมและผสมเถ้าลอยตามลำดับ แต่เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดลดลงร้อยละ 23.97 และ 20.44 สำหรับคอนกรีตที่ไม่ผสมและผสมเถ้าลอยตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความแข็งแรงน้อยกว่าทราย จึงทำให้การแตกร้าวสามารถแตกผ่านเถ้าก้นเตาได้ง่ายกว่าทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เพสต์จะมีความแข็งแรงต่ำ ความแข็งแรงของมวลรวมจึงมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมาก อย่างไรก็ตามหากควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์และค่าการยุบตัวให้ใกล้เคียงกัน การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ในปริมาณน้อยว่าร้อยละ 30 จะไม่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงมากนัก (Andrade, L.B., Rocha, J.C. and M. Cheriaf, 2009)



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่มี w/b=0.35 บ่มน้ำ 7 วัน



รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีตที่มี w/b=0.55 บ่มน้ำ 7 วัน

3.3 อิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัด

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุบ่มภายในของคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยจะใช้ดัชนีวัดผลการบ่ม (Curing Sensitivity Index, CSI) ในการเปรียบเทียบ โดย CSI เป็นอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของกำลังอัดในการบ่มที่แตกต่างกันเทียบกับการบ่มน้ำ 7 วัน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้การบ่มน้ำ 28 วัน เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาการบ่มที่นิยมใช้ในการก่อสร้างจริงคือ 7 วันเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานจริงที่เกิดขึ้น ค่า CSI สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ในกรณีที่ CSI มีค่าสูงแสดงว่าการบ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมาก

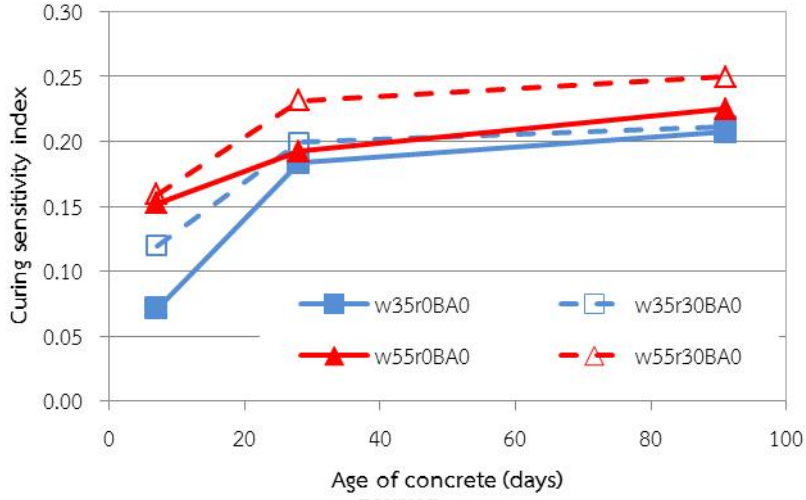
$$CSI = \left(\frac{f_c'(c) - f_c'(i)}{f_c'(c)}\right) \quad (1)$$

โดย CSI คือ ดัชนีวัดผลการบ่ม, $f_c'(c)$ คือกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 7 วัน และ $f_c'(i)$ คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่บ่ม

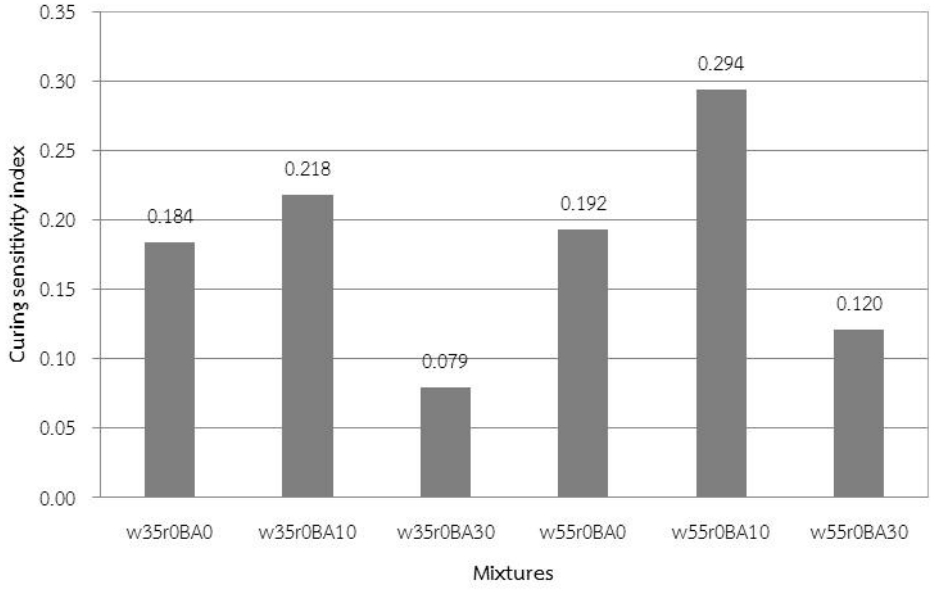
จากผลการทดสอบดังรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่า CSI ที่อายุ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยต้องการการบ่มมากกว่า ทั้งในคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตกำลังปกติ นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตกำลังอัดปกติ (w/b=0.55) มีค่า CSI สูงกว่าคอนกรีตกำลังสูง (w/b=0.35) แสดงให้เห็นว่าการบ่มมีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มี w/b สูง มากกว่าคอนกรีตที่มี w/b ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มี w/b สูง มีช่องว่างที่ต่อเนื่องภายในเนื้อคอนกรีตมากกว่า ทำให้น้ำจากการบ่มสามารถเข้าไปได้ดี และหากคอนกรีตสัมผัสกับอากาศช่องว่างเหล่านี้จะทำให้น้ำจากคอนกรีตระเหยออกสู่สภาพแวดล้อมได้ง่ายขึ้น กำลังอัดที่ได้จึงมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพการบ่มได้มาก ในขณะที่คอนกรีตที่มี w/b ต่ำ มีความหนาแน่นสูงและมีช่องว่างที่ต่อเนื่องน้อย ทำให้น้ำเข้าหรือออกจากคอนกรีตได้ยาก กำลังอัดที่ได้จึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าคอนกรีตที่มี w/b สูง

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าก้นเตาต่อค่า CSI ของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย ดังรูปที่ 9 พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ทำให้ค่า CSI เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการใช้เถ้าก้นเตาน้อยเกินไปจึงมีน้ำที่กักเก็บในเถ้าก้นเตาไม่เพียงพอประกอบกับเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับอากาศ น้ำในคอนกรีตอาจระเหยออกจากคอนกรีตได้มากกว่า ส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าก้นเตา ซึ่งเกิดจากการที่เถ้าก้นเตามีความพรุนมากกว่าทราย ในขณะที่การใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ทำให้ค่า CSI ของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตาถึงร้อยละ 57.79 และ 37.46 สำหรับคอนกรีตกำลังสูงและกำลังปกติตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าก้นเตาในคอนกรีตกำลังสูงมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ในคอนกรีตกำลังปกติ และควรใช้ในปริมาณที่มากเพียงพอ เพื่อให้มีน้ำที่ถูกกักเก็บในเถ้าก้นเตาเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องภายในคอนกรีต ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าร้อยละการกักเก็บน้ำเท่ากับ 29.51 หากใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30 จะมีน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในเถ้าก้นเตา 15.98 และ 48.19 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ ตามลำดับ

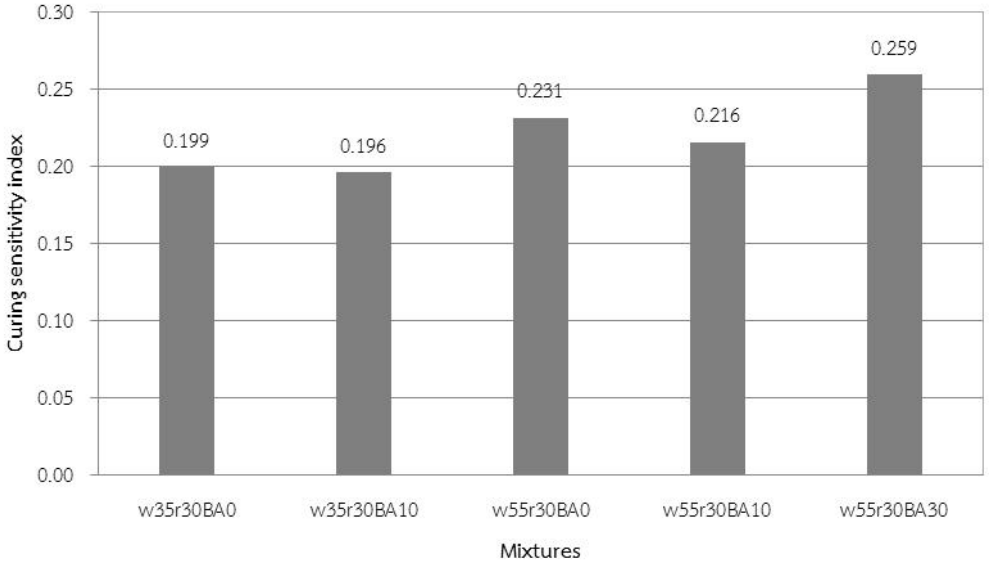
ผลของเถ้าก้นเตาต่อค่า CSI ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย แสดงดังรูปที่ 10 ในกรณีของคอนกรีตผสมเถ้าลอย พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ทำให้ค่า CSI ลดลงเล็กน้อย ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามกับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมทำให้มีน้ำอิสระเพิ่มขึ้นในคอนกรีต สังเกตได้จากค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้น น้ำอิสระดังกล่าวร่วมกับน้ำที่ถูกกักเก็บในเถ้าก้นเตาจึงช่วยให้ค่า CSI ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลดลง ดังนั้นการกำหนดปริมาณการใช้เถ้าก้นเตาที่เหมาะสมในคอนกรีตผสมเถ้าลอย จึงควรพิจารณาน้ำอิสระที่เกิดจากการใช้เถ้าลอยร่วมกับน้ำที่กักเก็บในเถ้าก้นเตาด้วย ส่วนการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ทำให้ค่า CSI ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่า CSI ที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอย



รูปที่ 9 ผลของเถ้าก้นเตาต่อค่า CSI ของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย



รูปที่ 10 ผลของเถ้าก้นเตาต่อค่า CSI ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

4. สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าก้นเตาทำให้ค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น

2. การใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ในคอนกรีตกำลังสูง (w/b=0.35) ทำให้คอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดในระยะยาวมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตา แต่เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 พบว่าในกรณีของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 91 วัน ลดลงร้อยละ 12

3. การใช้เถ้าก้นเตาในคอนกรีตกำลังปกติ (w/b=0.55) ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น โดยการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ทำให้กำลังอัดลดลงร้อยละ 5.69 และ 3.75 สำหรับคอนกรีตที่ไม่ผสมและผสมเถ้าลอยตามลำดับ แต่เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ทำให้กำลังอัดลดลงร้อยละ 23.97 และ 20.44 สำหรับคอนกรีตที่ไม่ผสมและผสมเถ้าลอยตามลำดับ

4. คอนกรีตผสมเถ้าลอยต้องการการบ่มมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และการบ่มมีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มี w/b สูง มากกว่าคอนกรีตที่มี w/b ต่ำ การใช้เถ้าก้นเตาในคอนกรีตกำลังสูงมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ในคอนกรีตกำลังปกติ และควรใช้ในปริมาณที่มากเพียงพอ เพื่อให้มีน้ำที่ถูกกักเก็บในเถ้าก้นเตาเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องภายในคอนกรีต

5. การใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ทำให้ค่า CSI ลดลง ในขณะที่การใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ทำให้ค่า CSI เพิ่มขึ้น ซึ่งการหาปริมาณเถ้าก้นเตาที่เหมาะสมในคอนกรีตผสมเถ้าลอย ควรพิจารณาน้ำอิสระที่เกิดจากการใช้เถ้าลอยร่วมกับน้ำที่กักเก็บในเถ้าก้นเตา

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กลุ่มวิจัยวิศวกรรมโยธาเพื่อชุมชนและอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา โครงการส่งเสริมการผลิตผลงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการดำเนินงานนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

6. เอกสารอ้างอิง

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ. คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. 2546. **มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-46 ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต.** กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

ธีรติ ศรีจันทร์, Kinaanath Hussain, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์, สมนึก ตั้งเติมสิริกูล และบุรฉัตร ฉัตรวีระ. 2553. การศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต และการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานต่างกัน และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุบ่มภายใน. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6**. เพชรบุรี. MAT71.

สุพัฒน์ชัย ใจช่วย, สรัณกร เหมะวิบูลย์, สนธยา ทองอรุณศรี, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์ และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล. 2555. ผลของการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาต่อการหดตัวของคอนกรีต. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 8**. ชลบุรี. MAT19.

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.

Herrera, A.D.; Aïtcin, P.C.; and Petrov, N. 2007. Effect of Saturated Lightweight Sand Substitution on Shrinkage in 0.35 w/b Concrete. **ACI Materials Journal**. 104(1): 48-52.

Cusson, D.; and Hoogeveen, 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.

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.

Ghafoori, N.; and Bucholc, J. 1997. Properties of high-calcium dry bottom ash concrete. **ACI Materials Journal**. 94(2): 90–101.

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.