

อิทธิพลของเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าต่อการเกิดความร้อนและการหดตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

Influence of Powerplant Biomass Ash on Hydration Heat and Shrinkage of Self-Compacting Concrete

ธนธรณ์ คัมภีร์ยิ่งเจริญ¹ และ มงคล นามลักษณ์^{2*}

Thanatorn Kumpeeyingcharoen¹ and Mongkhon Narmluk^{2*}

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

^{*1,2}Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

Received : 2020-07-24 Revised : 2020-09-04 Accepted : 2020-09-07

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการเกิดความร้อนและการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวลแบบไม่บด ในการทดลองได้นำเถ้าชีวมวลแบบไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 0, 10 และ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสานรวม (500 kg/m^3) คุณสมบัติของคอนกรีตที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/p) เวลาไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm (t_{500}) อุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีต ผลการวิจัย พบว่า เมื่อควบคุมค่าการไหลแผ่ให้เท่ากัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชีวมวลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า w/p เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ระยะเวลาไหลแผ่ t_{500} ลดลง อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการหดตัวแบบอโตจีนิสมีค่าลดลง ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชีวมวลแบบไม่บดในการผลิตคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองได้ สามารถลดอุณหภูมิภายในและการหดตัวแบบอโตจีนิส ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกร้าวในช่วงอายุต้นได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : คอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง,

เถ้าชีวมวล, การไหลแผ่, ความร้อน
เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน, การหดตัว
แบบอโตจีนิส

Abstract

This research presented the study of heat of hydration and autogenous shrinkage of self-compacting concrete containing unground biomass ash. In the experiment, the unground biomass ash was used to replaced ordinary Portland cement at the ratio of 0, 10, and 20 percent by weight of total binder (500 kg/m^3). The investigated concrete properties included water to powder ratio (w/p), slump flow time to 500 mm (t_{500}), temperature induced by hydration reaction, and autogenous shrinkage of the concrete. The results revealed that, at the same flow spread, an increase of biomass ash replacement ratio resulted in a linear increase of water to powder ratio (w/p) and a decrease of t_{500} , maximum concrete temperature, and autogenous shrinkage strain of concrete. These results indicate that the use

* มงคล นามลักษณ์

E-mail : mongkhon.nar@kmutt.ac.th

of unground biomass ash in self-compacting concrete can reduce the internal temperature and the autogenous shrinkage, which are the cause of early age cracking.

Keywords : Self-compacting concrete, Biomass ash, Slump flow, Heat of hydration, Autogenous shrinkage.

1. บทนำ

คอนกรีตที่อัดตัวแน่นได้เอง (Self-Compacting Concrete, SCC) คือ คอนกรีตที่ถูกออกแบบให้มีความเหลวพิเศษ จนสามารถไหลลงและเติมเต็มแบบหล่อได้ด้วยน้ำหนักตัวเองโดยไม่ต้องใช้แรงภายนอกเพื่อให้แน่น นอกจากนี้ SCC ยังมีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น เหล็กเสริมที่มีความซับซ้อน และมีความต้านทานต่อการแยกตัวได้เป็นอย่างดี อัตราส่วนผสมของ SCC มีความแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป คือ ใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากเพื่อเพิ่มเนื้อซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการไหล ประกอบกับการลดขนาดและปริมาณของมวลรวมหยาบ ในขณะที่ใช้มวลรวมละเอียดในปริมาณใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่า SCC ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ค่อนข้างต่ำร่วมกับการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ในปริมาณมาก เพื่อทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนืดที่เหมาะสมต่อการไหลตัวโดยไม่เกิดการแยกตัว [1] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ SCC มีราคาสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป อีกทั้งการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากทำให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสและเกิดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ส่งผลให้ SCC มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวในช่วงอายุต้น และปูนซีเมนต์ยังเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นจำนวนมาก [2]

แนวคิดหนึ่งในการแก้ปัญหาข้างต้น คือ การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุปอซโซลาน เช่น

เถ้าลอย เถ้ากลบ และเถ้าชีวมวลที่เป็นของเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร เป็นต้น [3] ซึ่งจากงานวิจัยของ ศศิธร ปราสาทหินพิมาย และคณะ [4] ได้ศึกษาการใช้เถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้า ซึ่งผ่านการบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 ในการผลิต SCC โดยการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) คงที่ และปรับเปลี่ยนปริมาณสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่ใกล้เคียงกัน ผลการศึกษาพบว่า การบดเถ้าชีวมวลให้มีความละเอียดสูง ช่วยทำให้แทรกตัวในช่องโพรงแคพิลลารี (Capillary pores) และทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น เถ้าชีวมวลที่บด 2 ชั่วโมง ทำให้คอนกรีต SCC มีความสามารถในการไหลดีกว่าเถ้าชีวมวลที่บด 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณภาพเถ้าชีวมวลด้วยการบด จำเป็นต้องใช้พลังงานและงบประมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนวัสดุการในผลิตคอนกรีตอีกด้วย ต่อมา ชัยภักดิ์ สุวาชาติ และคณะ [5] ได้ศึกษาการใช้เถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าซึ่งไม่ผ่านการบด เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 15 และ 20 ในการผลิต SCC โดยการกำหนด w/b เท่ากับ 0.33 และปริมาณสารลดน้ำคงที่ คือ ร้อยละ 1.3 จากผลการศึกษา พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลทำให้การไหลแผ่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดย SCC ที่ใช้เถ้าชีวมวลร้อยละ 10 มีค่าการไหลแผ่ต่ำสุด นอกจากนี้พบว่า SCC ที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวล ร้อยละ 10-20 มีอุณหภูมิภายในสูงสุดใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 5 องศาเซลเซียส

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าการศึกษาผลกระทบของเถ้าชีวมวลที่มีต่อการเกิดความร้อนและการหดตัวแบบออโตจีนัสของ SCC ยังมีน้อยมาก ในขณะที่คุณสมบัติทั้งสองข้างต้นมีความเกี่ยวข้องกับการแตกร้าวในช่วงอายุต้นของ SCC ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการบดที่มีต่อสมรรถนะการไหลทั้งค่าการไหลแผ่และเวลา t_{500} พฤติกรรมการหดตัวแบบออโตจีนัสในช่วงอายุต้น และการเกิดความร้อน

อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในคอนกรีต SCC โดยใช้เถ้าชีวมวลแหล่งเดียวกันกับ ชัยภักดิ์ สุวชาติ และคณะ [5] แต่กำหนดอัตราส่วนผสมของ SCC แตกต่างกัน คือ ควบคุมปริมาณสารลดน้ำให้คงที่ ร้อยละ 1.0 และปรับเปลี่ยน w/b เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่ 650 ± 10 mm

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [6] เป็นวัสดุประสานหลักและเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จังหวัดชัยนาท เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ สมบัติทางกายภาพของวัสดุทั้งสอง แสดงในตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าชีวมวล แสดงในรูปที่ 1 สำหรับมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำสะอาด มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ค่าการดูดซึมน้ำในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ร้อยละ 1.10 และมีค่าดัชนีความละเอียดเท่ากับ 2.21 สำหรับหินใช้หินปูนบดย่อยขนาดเม็ดโตสุดเท่ากับ 19 mm (3/4") มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ค่าการดูดซึมน้ำในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ร้อยละ 0.63 ส่วนสารลดน้ำใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ประเภทโพลีคาร์บอิกซีเลต มีความหนาแน่น 1.06 กรัม/ลูกบาศก์ และน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตใช้น้ำประปาสะอาด



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าชีวมวล

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

ตัวอย่างวัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	พื้นที่ผิว (mm^2)	น้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)
Cement	3.13	3,470	-
BFA	1.99	-	15.5

หมายเหตุ : BFA คือ เถ้าชีวมวลแบบไม่บด

2.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย อัตราส่วนผสมคอนกรีต SCC ในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าชีวมวลชนิดไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยควบคุมการไหลแผ่ (Slump flow) ของคอนกรีตสดเท่ากับ 650 ± 10 mm รายละเอียดของส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต (kg/m^3)

ชนิด	อัตราส่วนผสมคอนกรีต (kg/m^3)					
	ปูนซีเมนต์	เถ้าชีวมวล	หิน	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ (%)
Control	500	-	720	880	195	1.0
C90BFA10	450	50	720	880	210	1.0
C80BFA20	400	100	720	880	225	1.0

หมายเหตุ : C80BFA20 หมายถึง ใช้ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 80 และเถ้าชีวมวล ร้อยละ 20

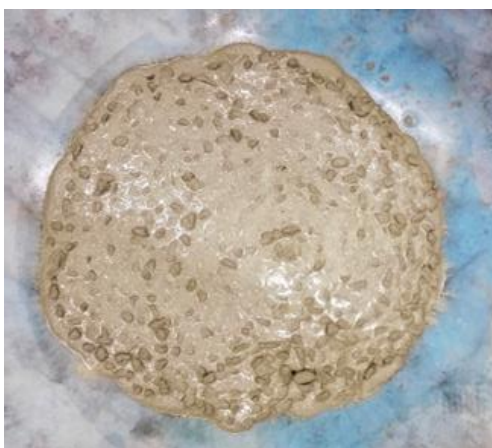
2.3 การผสมคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ใช้การผสมด้วยแรงคนในกระบะผสมคอนกรีต โดยเริ่มจากนำทรายและปูนซีเมนต์คลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำที่ผสมกับสารลดน้ำเรียบร้อยแล้ว ปริมาณร้อยละ 70 ของทั้งหมด แล้วผสมให้เข้ากันประมาณ 3 นาที ต่อด้วยการเติมเถ้าชีวมวลทั้งหมด ผสมให้เข้ากันประมาณ 3 นาที

จากนั้นเติมหินทั้งหมด ผสมให้เข้ากันประมาณ 2 นาที แล้วเติมน้ำที่เหลือทั้งหมดลงไป ผสมต่อไปจนสังเกตว่าเนื้อคอนกรีตมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน จึงนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ

2.4 วิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้ทดสอบสมรรถนะการไหลของคอนกรีต SCC ด้วยการทดสอบค่าการไหลแผ่ (Slump flow) และระยะเวลาที่ใช้ในการไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm (t_{500}) ตามข้อกำหนดของ EFNARC ปี ค.ศ.2002 [7] ซึ่งกำหนดเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยใช้กรวยสำหรับการทดสอบค่ายุบตัว วางหงายให้ปลายกรวยด้านแคบสัมผัสกับแผ่นเหล็ก จากนั้นเทคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องกระทุ้งให้แน่น แล้วยกกรวยทดสอบขึ้นในแนวตั้งปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่อิสระด้วยน้ำหนักตนเอง เริ่มจับเวลาที่คอนกรีตไหลแผ่จนถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm จึงหยุดเวลาและบันทึกเป็นค่าเวลา t_{500} จากนั้นปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่จนหยุดนิ่ง (ดังรูปที่ 2) จึงวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่ออกใน 2 แนวที่ตั้งฉากกัน เพื่อหาค่าการไหลแผ่เฉลี่ย



รูปที่ 2 การทดสอบค่าการไหลแผ่

ตารางที่ 3 เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับการทดสอบการไหลแผ่ [7]

ผลการทดสอบ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ	
		ค่าน้อยที่สุด	ค่ามากที่สุด
1. ค่าการไหลแผ่	มม.	650	800
2. t_{500}	วินาที	2	5

การทดสอบการเกิดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต เป็นการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในตัวอย่างคอนกรีต ขนาด $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ จำนวน 1 ตัวอย่าง หลังจากเทคอนกรีตลงในแบบหล่อทำการวัดอุณหภูมิโดยเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่กึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง จากนั้นปิดฝาแบบหล่อ คลุมด้วยฉนวนกันความร้อนและปิดด้วยแผ่นโฟมหนา 7.5 mm ทั้ง 6 ด้านของแบบหล่อ ดังรูปที่ 3 เพื่อไม่ให้สูญเสียความร้อนในคอนกรีต ทำการเก็บค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล UCAM-65B ดังรูปที่ 4 เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง

การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนิสตามมาตรฐาน ASTM C157 [8] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด $7.5 \times 7.5 \times 28.5 \text{ cm}^3$ หลังจากหล่อเทคอนกรีตแล้ว ให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างคอนกรีตออกจากแบบหล่อ และห่อหุ้มแท่งตัวอย่างด้วยพลาสติกใส 3 ชั้น ตามด้วยเทปอลูมิเนียม 2 ชั้น เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ดังรูปที่ 5 หลังจากนั้นวัดค่าการหดตัวของแท่งตัวอย่าง ด้วยเครื่องสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงความยาวแบบดิจิทัล (Digital Length Comparator) ซึ่งมีความแม่นยำในการวัดได้ถึง 0.001 มิลลิเมตร ตั้งแต่อายุ 24 ชั่วโมง จนถึง 28 วัน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ต้องการ

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (Water to powder ratio, w/p) ที่ต้องใช้

ในการผสมคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่เท่ากับ 650 ± 10 mm จากรูปจะเห็นว่าอัตราส่วน w/p ที่ต้องการ เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราค่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลโดยที่คอนกรีตผสมเถ้าชีวมวล ร้อยละ 10 และ 20 (C90BFA10 และ C80BFA20) ต้องใช้อัตราส่วน w/p เพิ่มขึ้นเป็น 0.42 และ 0.45 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ที่ใช้อัตราส่วน w/p เท่ากับ 0.39 ซึ่งมีสาเหตุมาจากความพรุนในอนุภาคของเถ้าชีวมวล ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำเข้าไปในอนุภาค ดังนั้นเมื่อต้องการทำให้ค่าการไหลแผ่เท่ากับคอนกรีตควบคุม จึงต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมเพิ่มขึ้น [9-10]



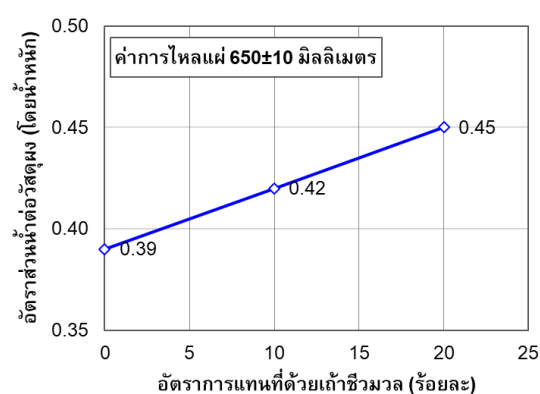
รูปที่ 3 แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบความร้อน



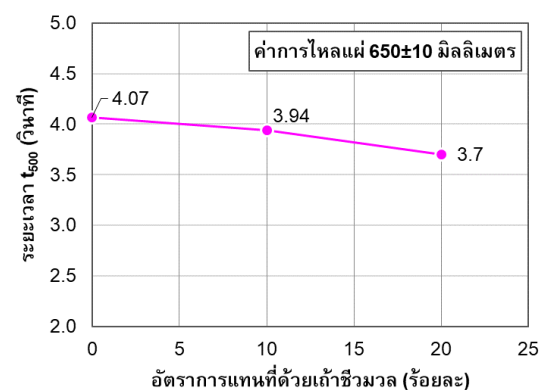
รูปที่ 4 เครื่องบันทึกข้อมูล UCAM-65B



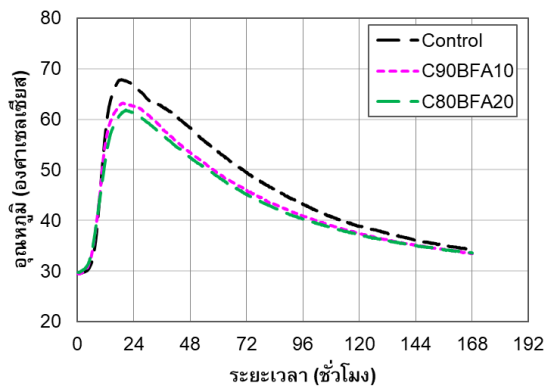
รูปที่ 5 ตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส



รูปที่ 6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมที่ต้องการ เมื่อควบคุมค่าการไหลแผ่ที่เท่ากับ 650 ± 10 mm



รูปที่ 7 ระยะเวลา t_{500} เมื่อควบคุมค่าการไหลแผ่คงที่เท่ากับ 650 ± 10 mm



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

3.2 ระยะเวลา t_{500}

จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลและระยะเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm (t_{500}) จากรูปจะเห็นว่าระยะเวลา t_{500} ของคอนกรีตที่ศึกษาแปรผันอยู่ในช่วง 4.07-3.70 วินาที ซึ่งอยู่ในเกณฑ์คุณสมบัติของ SCC (2-5 วินาที) [7] การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลแบบไม่บด ที่ร้อยละ 10 และ 20 (โดยน้ำหนัก) ทำให้ระยะเวลา t_{500} ลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าเมื่อออกแบบให้มีค่าการไหลแก่เท่ากัน โดยใช้ w/p ที่สูงขึ้น คอนกรีต SCC ที่ส่วนผสมของเถ้าชีวมวลจะมีความเร็วในการไหลมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าชีวมวลซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ และมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลด้วยน้ำหนักที่เท่ากัน จึงทำให้ปริมาตรเพสต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคทรายและหินในซีเมนต์เพสต์มีระยะห่างมากขึ้น ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลรวม [11]

3.3 การเกิดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากรูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในคอนกรีต SCC เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากรูปจะเห็นว่าคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และถึงจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดในช่วง 24 ชั่วโมงแรก จากนั้น

อุณหภูมิเริ่มลดลงอย่างช้า ๆ ตามเวลา เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก ซึ่งเป็นไปตามการคาดการณ์ในทางทฤษฎี รายละเอียดของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดสำคัญต่าง ๆ ในรูปที่ 8 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีอุณหภูมิเริ่มต้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 29 องศาเซลเซียส) แต่หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว พบว่า คอนกรีตควบคุม (Control) มีค่าอุณหภูมิภายในสูงสุด คือ 67.8 องศาเซลเซียส การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลร้อยละ 10 และ 20 (C90BFA10 และ C80BFA20) ทำให้อุณหภูมิสูงสุดในก่อนคอนกรีตลดลงเป็น 63.3 และ 61.8 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 4.5 และ 6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิได้ใกล้เคียงกับเถ้าลอยและเถ้าปาล์มน้ำมัน หากใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงถึงร้อยละ 30-40 จะเห็นการลดอุณหภูมิที่ชัดเจนยิ่งขึ้น [12] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเริ่มแรก พบว่า คอนกรีต Control, C90BFA10 และ C80BFA20 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เท่ากับ 38.3, 33.8 และ 32.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชีวมวลช่วยลดการเกิดความร้อนภายในคอนกรีตได้ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับวัสดุพอลิโพรพิลีนอื่น ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในระบบต่ำลง จึงเกิดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์น้อยลง [12] นอกจากนี้พบว่าเวลาที่เกิดอุณหภูมิสูงสุดในคอนกรีต SCC ที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวลเกิดขึ้นช้ากว่าคอนกรีตควบคุมเพียงเล็กน้อย ประกอบกับความชันของเส้นกราฟในช่วง 12 ชั่วโมงแรก มีค่าเท่ากัน แสดงว่าเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการวิจัยนี้ไม่ทำให้เกิดการเร่งหรือหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4 อุณหภูมิสูงสุดภายในคอนกรีตและเวลาที่
เกิด

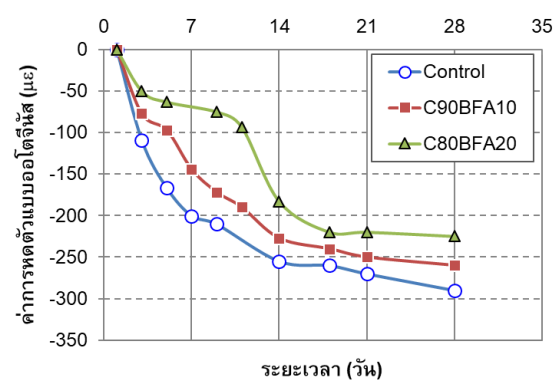
ส่วนผสม คอนกรีต	อุณหภูมิ เริ่มต้น (C°)	อุณหภูมิ สูงสุด (C°)	อุณหภูมิที่ เพิ่มขึ้น (C°)	เวลาที่ เกิด อุณหภูมิ สูงสุด (ชั่วโมง)
Control	29.5	67.8	38.3	18.67
BFA10	29.5	63.3	33.8	19.33
BFA20	29.8	61.8	32.0	20.50

3.4 การหดตัวแบบออโตจีนิส

จากรูปที่ 9 แสดงพฤติกรรมการหดตัวแบบออโตจีนิสคอนกรีต SCC ที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวลเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม จากรูปจะเห็นว่าคอนกรีต SCC ที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวล มีค่าการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ และค่าการหดตัวลดลงเมื่ออัตราการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วง 14 วันแรก ที่คอนกรีตผสมชีวมวลมีค่าการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างมาก นอกจากนี้พบว่า ค่าการหดตัวมากกว่าร้อยละ 80 ของคอนกรีตทุกกลุ่ม เกิดขึ้นภายใน 14 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของการหดตัวในคอนกรีตผสมเถ้าชีวมวลและคอนกรีตควบคุมมีความใกล้เคียงกัน ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าชีวมวลแบบไม่บดมีประสิทธิภาพในการช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีต SCC ในช่วงอายุไม่เกิน 14 วัน และเมื่อพิจารณาที่อายุ 28 วัน พบว่า คอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล ร้อยละ 10 และ 20 (C90BFA10 และ C80BFA20) มีค่าการหดตัวเท่ากับ -260 และ -225 ไมโครสเตรน ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (-290 ไมโครสเตรน) คิดเป็นร้อยละ 11.3 และ 22.4 ตามลำดับ

ในทางทฤษฎีการหดตัวแบบออโตจีนิสจะมีค่ามากในคอนกรีตที่ใช้ปริมาณและความละเอียดของปูนซีเมนต์สูง และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ [2]

ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าชีวมวลในงานวิจัยนี้ มีค่าการหดตัวแบบออโตจีนิสต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม อธิบายได้จาก 1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/p) ที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม 2) ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากถูกแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวล 3) เถ้าชีวมวลซึ่งมีรูพรุน อาจดูดซับน้ำไว้ในอนุภาค ทำให้การลดลงของความชื้นภายในคอนกรีตล่าช้าออกไปกว่าปกติ จึงช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนิสได้มาก [13-15]



รูปที่ 9 ผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนิส

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

4.1 ในกรณีที่ใช้สารลดน้ำคงที่ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลแบบไม่บด ทำให้คอนกรีตต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/p) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

4.2 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลแบบไม่บด ทำให้คอนกรีตใช้เวลาในการไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm (t_{500}) ต่ำลงตามปริมาณเถ้าแสดงถึงคอนกรีตมีความเร็วในการไหลมากขึ้น มีความสามารถในการไหลแทรกตัวเต็มเต็มแบบหล่อได้ดีขึ้น

4.3 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลแบบไม่บด ทำให้คอนกรีตมีค่าการหดตัวลดลงตามปริมาณ

เถ้าโดยเฉพาะในช่วง 14 วันแรก ซึ่งเป็นผลดีต่อการลดความเสี่ยงในการแตกร้าวในช่วงอายุต้น

4.4 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลแบบไม่บด ทำให้อุณหภูมิสูงสุดภายในก้อนคอนกรีตลดลงตามปริมาณเถ้า โดยไม่มีผลต่อการหน่วงหรือเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชีวมวลช่วยลดการเกิดความร้อนภายในคอนกรีตได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ชีก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารลดน้ำ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มงคล นามลักษณ์, จักรกฤษ ไพศาลโสภณ และ สมพงษ์ รุจิรเสนีย์, “อิทธิพลของเถ้าลอยต่อสมรรถนะการไหลและการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีตชนิดอัดตัวแน่นได้เอง”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13, พ.ศ.2561 หน้า MAT55-62.
- [2] ชนายนท์ สิงห์ศิริ และ มงคล นามลักษณ์, “ผลกระทบของระยะเวลาบดเถ้าแกลบที่มีต่อการหดตัวแบบบอโตจีนัสและกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ”, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 25, พ.ศ.2561, หน้า 232-241.
- [3] กฤษดา เสือเอี่ยม และ ณัฐ มากุล, “การประยุกต์ใช้ผลผลิตพลอยได้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 36, พ.ศ.2556, หน้า 517-552.
- [4] ศศิธร ปราสาทหินพิมาย, ชุตินาสก์ เมืองเมืองพุท, อโนชา ปาลกะเชนทร์ และ มงคล นามลักษณ์, “ผลของการใช้เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งบดละเอียดด้วยเวลาแตกต่างกันที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เอง”, การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 2, พ.ศ.2560 หน้า 87-99.
- [5] ชัยศักดิ์ สุวชาติ, ธีรรัตน์ สิทธิ, พัทธยาพร พิระพันธ์ และ มงคล นามลักษณ์, “ผลกระทบของเถ้าชีวมวลที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อสมรรถนะการไหล อุณหภูมิภายใน และกำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดตัวแน่นได้เอง”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15, พ.ศ.2563 หน้า ENV01.
- [6] Thai Industrial Standard Institute. "TIS 15 : 2555 Thai standard for Portland Cement : Part I specification". TISI, 2012.
- [7] EFNARC. “Specification and guidelines for self-compacting concrete”. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Londres, 2002.
- [8] ASTM C157/C157M-17. "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete". ASTM International, 2017.
- [9] R. Rajamma, L. Senff, M.J. Ribeiro, J.A. Labrincha, R.J. Ball, G.C. Allen, and V.M. Ferreira. “Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement-based materials”. Composites Part B, 77, pp. 1-9, 2015.

- [10] G. Sua-iam and N. Makul. "Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate". *Construction and Building Materials*, 38, pp.455-464, 2013.
- [11] Md. Safiuddin, J.S. West, and K.A. Soudki. "Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material". *Construction and Building Materials*, 30, pp.833–842, 2012.
- [12] B.H. Nagaratnam, M.E. Rahman, A.K. Mirasa, M.A. Mannan, and S.O. Lame. "Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste". *Journal of Cleaner Production*, 112, pp.882-894, 2016.
- [13] G.R. De Sensale, A.B. Ribeiro, and A. Gonçalves. "Effects of RHA on autogenous shrinkage of Portland cement pastes". *Cement and Concrete Composites*, 30, pp.892–897, 2008.
- [14] G. Ye, N.V. Tuan, and H. Huang, "Rice Hush Ash as smart material to mitigate autogenous shrinkage in high (ultra-high) performance concrete", 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technology, pp.1-9, 2013.
- [15] V.T.A. Van, C. Röbller, D.D. Bui, and H.M. Ludwig. "Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete". *Cement and Concrete Composites*, 53, pp. 270–278, 2014.