

ผลของการใช้เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งบดด้วยเวลาแตกต่างกันที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เอง Effect of Bio-Fuel Ash with Different Grinding Periods on Properties of Self-Compacting Concrete

ศศิธร ปราสาทหินพิมาย, ชุตินาสน์ เมืองพุทธ, อโนชา ปาลกะเชนทร์, มงคล นามลักษณ์*

ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 10140

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

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของระยะเวลาบดเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีต่อความสามารถในการไหลอัดตัวและกำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เอง เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ศึกษานี้แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามระยะเวลาบด คือ เถ้าบด 1 ชั่วโมง เถ้าบด 2 ชั่วโมง และเถ้าผสมระหว่างเถ้าบด 1 ชั่วโมง กับเถ้าบด 2 ชั่วโมง ในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 ผลการศึกษาพบว่าเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 และ 2 ชั่วโมงมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 เมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10 20 30 (โดยน้ำหนัก) ในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เอง พบว่าค่า slump flow และและดัชนีการไหลผ่าน L-box มีค่าลดลง ส่วนเวลาในการไหล t_{50} มีค่ามากขึ้นตามปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้น เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 2 ชั่วโมง ให้ค่าการไหลแผ่สูงกว่าเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมงและเถ้าผสม นอกจากนี้ พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบดด้วยเวลา 2 ชั่วโมง จะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดขึ้นสามารถแทรกตัวในช่องโพรงและทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น

คำสำคัญ: คอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เอง, เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวล, การบด, การไหลแผ่, กำลังรับแรงอัด

Abstract

This research paper presents the effect of grinding period of ground bio-fuel ash (GBFA) on self-compacting ability and compressive strength of self-compacting concrete (SCC). The bio-fuel ash used in this study was divided into three categories, according to their grinding times: 1) GBFA1 with 1-hour grinding, 2) GBFA2 with 2-hour grinding, and 3) GBFA3 containing 50:50 weight ratio of GBFA1 and GBFA2. Test results showed that GBFA1 and GBFA2 possessed pozzolanic properties, complying with ASTM C618. They were then used to replace Portland cement with the replacement ratios of 10 20 and 30 %wt, to produce SCC. It was found that the slump flow diameter and L-box index decreased, while t_{50} flow time increased as the replacement ratios of the ashes increased. The use of GBFA2 with 2-hour grinding in SCC resulted in higher slump flow diameter, as compared to GBFA1 and GBFA3. It was also revealed that the SCC containing GBFA2 exhibited higher compressive strength than that with GBFA1, owing to its better filler effect and pozzolanic effect.

Keywords: Self-compacting concrete, Bio-fuel ash, Grinding, Slump flow, Compressive strength

1. ที่มาและความสำคัญ

คอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เอง (Self-compacting concrete, SCC) คือ คอนกรีตที่ถูกรออกแบบให้มีความเหลวสูงพิเศษ สามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมและแทรกตัวลงในแบบหล่อได้ดีด้วยน้ำหนักของคอนกรีตเอง โดยไม่ต้องจี้หรือเขย่าจากภายนอก และยังคงรักษาความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตไว้ได้โดยไม่เกิดการแยกตัว [1] แนวคิดพื้นฐานในการออกแบบส่วนผสมของ SCC คือ 1) การปรับเพิ่มปริมาตรซีเมนต์เพสต์หรือปรับลดปริมาตรมวลรวม 2) การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และ 3) การเพิ่มปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง [2] จากคุณลักษณะข้างต้น SCC จึงช่วยลดปัญหาการฟุ้งและคุณสมบัติไม่สมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตหลังการถอดแบบ โดยเฉพาะในจุดที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น ทำให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่ทนทานต่อการแทรกซึมของสารอันตรายจากสภาพแวดล้อมมากขึ้น และยังช่วยลดเวลาและต้นทุนแรงงานในการเทคอนกรีตอีกด้วย

การผลิต SCC จำเป็นต้องใช้ปริมาตรเพสต์สูงขึ้น ดังนั้นหากใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว จะทำให้ต้นทุนวัสดุสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ และยังทำให้คอนกรีตมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้นเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสขนาดมาก นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณมาก ยังมีส่วนในการเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้เกิดภาวะโลกร้อน [3] ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันงานวิจัยจำนวนมากจึงพยายามนำวัสดุประสานชนิดอื่นมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เช่น ซิลิกาฟูม [4] ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียด [5] เถ้าถ่านหิน [4-7] ผงหินปูน [8] และเถ้าแกลบ [9-10] เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิต SCC

ปัจจุบันโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทยได้บริหารเชื้อเพลิงตามสถานการณ์และฤดูกาล อาทิ โรงไฟฟ้าในจังหวัดชัยนาท ได้ใช้ของเหลือทิ้งจากการเกษตรที่สามารถหาได้ เช่น ชังข้าวโพด และ เปลือกไม้ เป็นเชื้อเพลิงเผาพร้อมกับแกลบ ในกรณีที่แกลบขาดแคลนและมีราคาแพง ดังนั้นเถ้าที่ได้จึงเรียกว่า เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวล (Bio-Fuel Ash, BFA) ซึ่งอาจมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างจากเถ้าแกลบล้วน จากการศึกษางานวิจัยในอดีตยังไม่พบรายงานเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าดังกล่าว และผลกระทบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต ดังนั้นการนำเถ้า BFA มาใช้ในการผลิต SCC จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ อย่างรอบด้าน งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการนำ BFA จากโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุป้อนโซลันเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต SCC และบทความวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการปรับปรุงความละเอียดของ BFA ด้วยการบดที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต SCC

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาสมบัติพื้นฐานและความเป็นวัสดุป้อนโซลันของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลจากโรงไฟฟ้าบดละเอียด

2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านการบดละเอียดด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เอง

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน

งานวิจัยจำนวนมากศึกษาอิทธิพลความละเอียดของวัสดุปอซโซลานที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีต Rukzon และคณะ [12] รายงานว่าการใช้เถ้าแกลบبدทำให้ความต้องการสารลดน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้น Régo และคณะ [13] พบว่าแม้ว่าเถ้าแกลบที่มีปริมาณซิลิกาอสัณฐานต่ำ แต่หากทำให้มีความละเอียดเพียงพอจะสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ Givi และคณะ [14] รายงานว่าการใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงจาก 95 ไมครอน เป็น 5 ไมครอน ทำให้การดูดซึมน้ำและการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตลดลง กำลังอัดสูงขึ้น แต่ทำให้ความสามารถทำงานได้ต่ำลง Venkatanarayanan และ Rangaraju [15] รายงานว่าการบดเถ้าแกลบให้ละเอียดขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น และสามารถแทรกตัวระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ดีขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเพสต์แน่นขึ้น แต่ระยะเวลาก่อตัวปลายช้าลง Abu Baka และคณะ [16] รายงานว่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียด (พื้นที่ผิว) ของเถ้าแกลบเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการบด และรูปร่างสัณฐานของอนุภาคเถ้าแกลบเปลี่ยนแปลงไป Xu และคณะ [17] ศึกษาผลของการใช้เถ้าแกลบที่บดด้วยระยะเวลาแตกต่างกันที่มีต่อสมบัติทางกล การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และความพรุนของซีเมนต์เพสต์ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดร้อยละ 10 พบว่าเถ้าแกลบที่บดด้วยระยะเวลา 30 นาที ทำให้เพสต์มีกำลังอัดสูงสุดและความพรุนต่ำ เนื่องจากมีการกระจายตัว การแทรกตัวระหว่างอนุภาคดี และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่บดด้วยระยะเวลาแตกต่างกันมีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับ Rukzon และคณะ [12] จากงานวิจัยที่กล่าวพอสรุปได้ว่า การใช้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดมากขึ้น เป็นผลดีต่อโครงสร้างจุลภาคและกำลังอัดของคอนกรีต แต่ยังไม่มีการศึกษาผลของระยะเวลาบดเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเผาแกลบร่วมกับซังข้าวโพดและเปลือกไม้

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลในงานคอนกรีต SCC

Akram และคณะ [18] กล่าวว่าสำหรับเถ้าชานอ้อยหากใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ความสามารถในการไหลของ SCC ผ่านเกณฑ์ EFNARC และกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม Sua-iam และคณะ [8] รายงานว่าการใช้เถ้าชานอ้อยร่วมกับผงหินปูนในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต SCC Safiuddin และคณะ [9-10] ได้ใช้เถ้าแกลบมีความละเอียดสูง (มีพื้นที่ผิวเบลน 2330 m²/kg) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิต SCC และพบว่าค่าการไหลแผ่ (slump flow) และค่าการไหลผ่าน J-ring และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณเพิ่มขึ้น เถ้าแกลบยังช่วยลดการเยิ้ม น้ำบนผิวหน้าคอนกรีต Safiuddin และคณะ [19] ได้ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 88.4) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิต SCC และพบว่าค่า slump flow และ J-ring flow ลดลง ขณะที่เวลาการไหลแผ่ T₅₀ และเวลาการไหลผ่าน V-funnel เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน ในขณะที่ Nagaratnam และคณะ [20] พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดร่วมกับเถ้าถ่านหิน จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการไหลของ SCC ให้ดีกว่าการใช้เถ้าปาล์ม

น้ำมันเพียงอย่างเดียว จากงานวิจัยที่กล่าวมาจะเห็นว่า การใช้เถ้าชีวมวลที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชีวมวลหลายชนิดร่วมกันยังมีจำนวนน้อย

3.3 การทดสอบสมรรถนะในการไหลตัวของคอนกรีตชนิดอัดตัวได้เอง

การทดสอบสมรรถนะการไหลตัวของ SCC มีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ของ SCC EFNARC [21]

การทดสอบ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ	
		ค่าน้อยที่สุด	ค่ามากที่สุด
1. ระยะการไหลแผ่ (Slump flow)	mm	650	800
2. ระยะการไหลแผ่ถึงเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ซม. (Slump flow at t_{50})	sec	2	5
3. ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวตั้ง (L-Box), H1/H2	-	0.8	1.0
4. ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวราบ (J-Ring)	mm	0	50

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2555 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2

2) เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวล (BFA) ได้มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลในจังหวัดชัยนาท ซึ่งเกิดจากการเผาเชื้อเพลิง 3 ชนิดร่วมกัน คือ แกลบร้อยละ 50 ซังข้าวโพดร้อยละ 25 และเปลือกไม้ร้อยละ 25 (โดยน้ำหนัก) ผ่านการอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบด โดยใช้ลูกเหล็กกลมขนาดน้ำหนักรวม 10 กิโลกรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ทำให้ได้เถ้าที่มีความละเอียด 2 ระดับ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2

3) มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำสะอาด ซึ่งมีการกระจายขนาดอนุภาคเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังรูปที่ 1 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.80 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 และมีการดูดกลืนน้ำร้อยละ 1.03

4) มวลรวมหยาบใช้หินปูนบดย่อย ขนาดเม็ดโตสุด 3/8 นิ้ว (9.52 มิลลิเมตร) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 และมีการดูดกลืนน้ำร้อยละ 0.63

5) สารลดน้ำพิเศษ ประเภทเมลามีนซัลโฟเนต ตามมาตรฐาน ASTM C 494-81 ประเภท F มีความถ่วงจำเพาะ 1.20

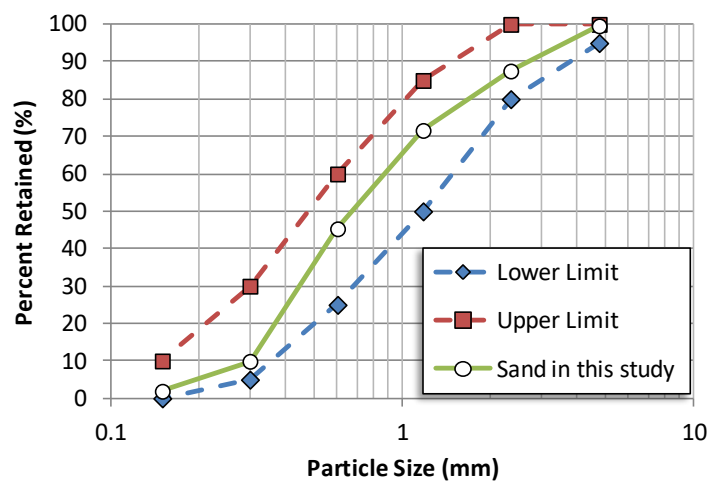
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

Materials	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	M ₂ O	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Portland Cement	70.4	15.9	3.79	3.71	0.75	4.22	0.43	0.18	2.00
GBFA1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	4.00
GBFA2	4.39	82.6	1.14	1.77	1.01	0.38	4.57	0.71	4.30

n/a = not available

4.2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งแบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 คอนกรีตควบคุม (Control) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว กลุ่มที่ 2 คอนกรีต GBFA1 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง กลุ่มที่ 3 คอนกรีต GBFA2 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 2 ชั่วโมง และ กลุ่มที่ 4 คอนกรีต GBFA3 ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง ร่วมกับเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 2 ชั่วโมง ในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยภาพรวมจะเห็นว่าปริมาณวัสดุประสานรวมคงที่เท่ากับ 520 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด แปรผัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10 20 และ 30 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน คงที่เท่ากับ 0.38 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานรวม อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบคงที่ เท่ากับ 60 : 40 โดยน้ำหนัก และปริมาณสารลดน้ำ (superplasticizer) มีความแตกต่างกันสำหรับแต่ละส่วนผสม เพื่อควบคุมค่าการไหลแผ่ (slump flow) ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ



รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคของมวลรวมละเอียด

4.3 การผสมคอนกรีตและหล่อตัวอย่าง

การผสมคอนกรีตได้ใช้เครื่องผสมแบบใบพัดกวนในแนวราบ ขั้นตอนแรกเริ่มจากการผสมมวลรวมทั้งหมดให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมปูนซีเมนต์และเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลลงในเครื่องผสม และผสมต่อเนื่องไปอีก 1 นาที แล้วจึงค่อยๆ เติมน้ำทั้งหมดที่มีส่วนผสมของสารลดน้ำ (superplasticizer) และเดินเครื่องผสมต่อเนื่องไปอีก 3 นาที เป็นอันแล้วเสร็จ จากนั้นแบ่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ไปทดสอบสมบัติในสภาวะคอนกรีตสด ซึ่งต้องดำเนินการแล้วเสร็จภายในเวลา 30 นาที คอนกรีตสดอีกส่วนหนึ่งนำไปหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ซึ่งใช้แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 150 มิลลิเมตร และปล่อยให้คอนกรีตไหลตัวเต็มแบบโดยไม่ต้องกระทุ้งหรือจี้เขย่า เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดแบบ และบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีตในน้ำจนถึงอายุทดสอบ

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลอัตโนมัติเองที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)						สารลดน้ำ (ร้อยละ)
	ปูนซีเมนต์	เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด		หิน	ทราย	น้ำ	
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง				
Control	520	-	-	604	880	198	1.0
GBFA1-10	468	52	-	604	880	198	1.4
GBFA1-20	416	104	-	604	880	198	1.6
GBFA1-30	364	156	-	604	880	198	1.8
GBFA2-10	468	-	52	604	880	198	1.2
GBFA2-20	416	-	104	604	880	198	1.4
GBFA2-30	364	0	156	604	880	198	1.6
GBFA3-10	468	26	26	604	880	198	1.3
GBFA3-20	416	52	52	604	880	198	1.5
GBFA3-30	364	78	78	604	880	198	1.7

ตัวอย่างคำอธิบายสัญลักษณ์: GBFA1-10 คือ ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง, GBFA2-10 คือ ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 2 ชั่วโมง, GBFA3-10 คือ ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ผสมกันด้วยอัตราส่วนน้ำหนักร้อยละ 50:50

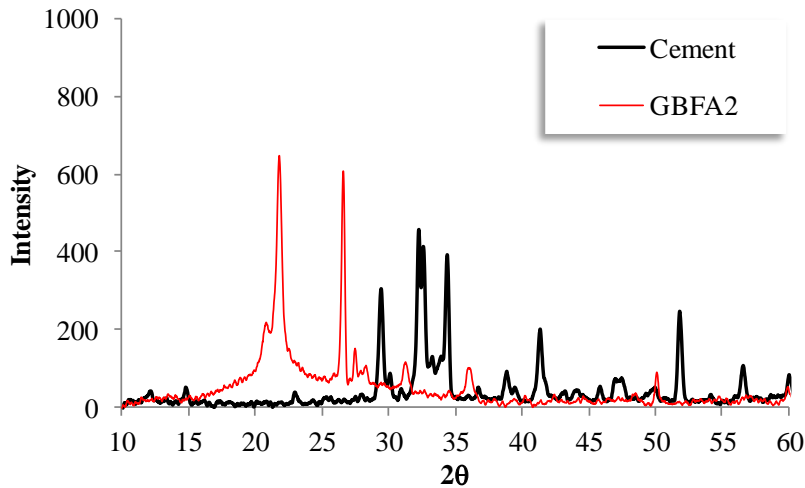
4.4 การทดสอบ

- 1) การทดสอบความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียด ได้ทำตามแนวทางของ ASTM C618 [22]
- 2) การทดสอบระยะการไหลแผ่สูงสุด (Slump flow) ตามมาตรฐาน EFNARC [21]
- 3) การทดสอบเวลาในการไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มิลลิเมตร (t_{50}) ตามมาตรฐาน EFNARC [21]
- 4) การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางด้วยวิธี J-Ring ตามมาตรฐาน EFNARC [21]
- 5) การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางด้วยวิธี L-box ตามมาตรฐาน EFNARC [21]
- 6) การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน BS EN 12390-3:2009 [23] ที่อายุ 3, 7, 28, และ 90 วัน

5. ผลและวิจารณ์

5.1 สมบัติพื้นฐานของเก้าอี้พอลิเมอร์ชีวมวล

ผลการตรวจวิเคราะห์ความเป็นผลึกเบื้องต้นด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ในรูปที่ 2 กราฟ XRD ยกตัวสูงเหนือแกน x เล็กน้อย บ่งชี้ว่าเก้าอี้พอลิเมอร์ชีวมวลที่ผ่านการบดแล้วมีความเป็นอสัณฐานปานกลาง มีแนวโน้มทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุที่เป็นผลึกปะปนอยู่ด้วย สังเกตจากยอดแหลมในบริเวณ 2θ ประมาณ 22 และ 27 องศา



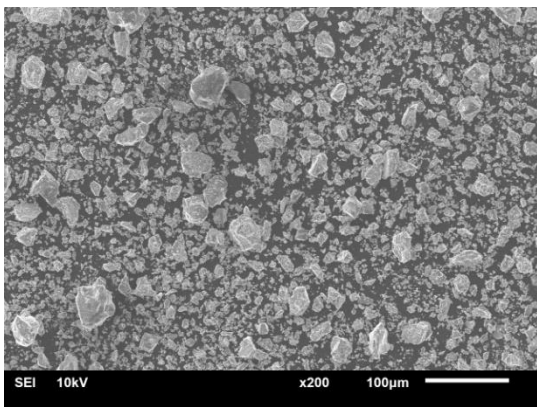
รูปที่ 2 ผลวิเคราะห์ XRD แสดงรูปแบบโครงสร้างผลึก

องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเก้าอี้พอลิเมอร์ชีวมวล ได้แสดงในตารางที่ 4 จะเห็นว่าเก้าอี้พอลิเมอร์ชีวมวลบด 2 ชั่วโมง มีปริมาณ SiO_2 ร้อยละ 82.6 ปริมาณ LOI และ SO_3 ร้อยละ 4.30 และ 0.38 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ASTM C618 [22] ผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 85.51 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 จัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท N [22] สำหรับเก้าอี้พอลิเมอร์ชีวมวลบด 1 ชั่วโมง ซึ่งไม่มีผลการทดสอบ แต่คาดว่าม้องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกไม่แตกต่างจากเก้าอี้พอลิเมอร์ชีวมวลบด 2 ชั่วโมง เนื่องจากการบดไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ [12,17]

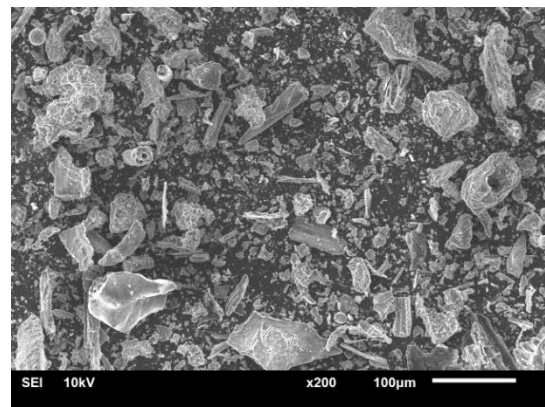
ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด เปรียบเทียบกับข้อกำหนด ASTM C618 [22]

คุณสมบัติ	เถ้าแกลบบด 1 ชั่วโมง (GBFA1)	เถ้าแกลบบด 2 ชั่วโมง (GBFA2)	ข้อกำหนดของ ASTM C618 [22]
			Class N
คุณสมบัติทางเคมี			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	n/a	85.51	>70.0
SO ₃	n/a	0.38	<4.0
Loss on Ignition (LOI)	4.00	4.30	<10.0
สมบัติทางกายภาพ			
น้ำหนักค้างบนตะแกรง เบอร์ 325 (%)	12.5	6.3	<34
ความต้องการน้ำ (% of Control)	112 ^a	108 ^a	<115
ดัชนีกำลังอัด:			
ที่อายุ 7 วัน (% of Control)	79.0 ^a	81.0 ^a	>75
ที่อายุ 28 วัน (% of Control)	81.0 ^a	84.4 ^a	>75

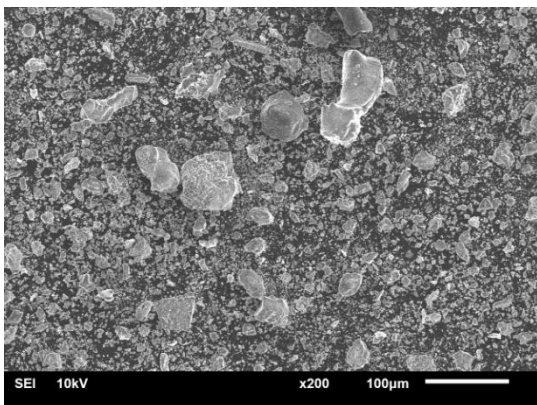
^a ใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงบด ร้อยละ 30, n/a = not available



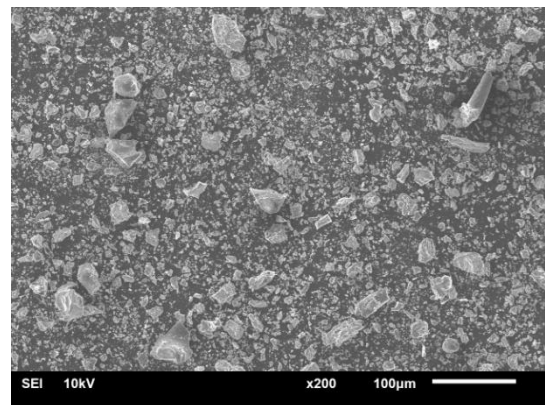
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC)



(ข) เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลจากโรงงาน (BFA)



(ค) เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง (GBFA1)



(ง) เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 2 ชั่วโมง (GBFA2)

รูปที่ 3 ลักษณะอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวล กำลังขยาย 200 เท่า

ลักษณะของอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียด ที่ได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ได้แสดงในรูปที่ 3(ค)-(ง) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง (GBFA1) ยังมีอนุภาคโดยรวมใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 2 ชั่วโมง (GBFA2) มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รูปที่ 3(ก) และมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอมากกว่าเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง (GBFA1)

จากตารางที่ 4 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 12.5 และ 6.3 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (ต่ำกว่าร้อยละ 34) ASTM C618 [22] ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่มีส่วนผสมของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบดทั้ง 2 ขนาด ได้แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน มีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ดังนั้นเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบดทั้งสองขนาดจึงมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 [22] จำแนกได้เป็นวัสดุปอซโซลานประเภท N และสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยให้ค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีต

ตารางที่ 5 สมบัติด้านการไหลอัดตัวของคอนกรีตชนิดไหลอัดตัวได้เองผสมเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียด

ตัวอย่าง	การทดสอบ			
	Slump Flow (mm)	t_{50} (sec)	J-Ring (mm)	L-box
Control	735.0	2	22.5	0.83
GBFA1-10	717.5	3	0	0.89
GBFA1-20	707.5	4	0	0.88
GBFA1-30	702.5	5	7.5	0.85
GBFA2-10	747.5	2	2.5	0.95
GBFA2-20	720.0	2.5	10	0.90
GBFA2-30	710.0	3	15	0.88
GBFA3-10	740.0	2.37	5	0.90
GBFA3-20	715.0	2.88	5	0.89
GBFA3-30	707.0	4	5	0.86

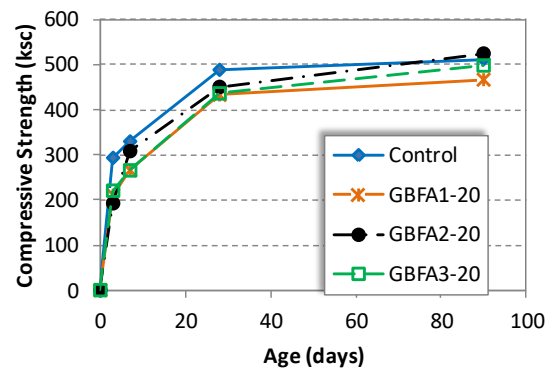
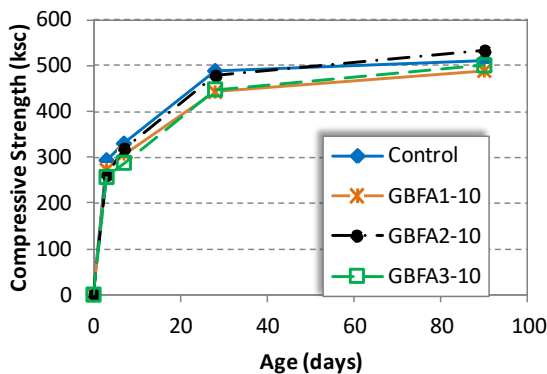
5.2 ผลของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลต่อกำลังรับแรงอัดสมบัติด้านการไหลอัดตัว

จากตารางที่ 5 พบว่า SCC ที่ผสมเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่า slump flow แปรผันอยู่ในช่วง 702.5-747.5 มิลลิเมตร เวลาในการไหล t_{50} แปรผันอยู่ในช่วง 2-5 วินาที ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวราบ ซึ่งคำนวณจากผลต่างระหว่าง slump flow และ J-ring flow ซึ่งได้ค่าแปรผันอยู่ในช่วง 0-15 มิลลิเมตร และความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวตั้ง L-box index (H2/H1) แปรผันอยู่ในช่วง 0.85-0.95 ซึ่งดัชนีทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณสมบัติของ SCC ที่กำหนดโดย EFNARC [21] เมื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาบดพบว่า เถ้าที่บดด้วยเวลา 2 ชั่วโมง ให้ค่าการไหลแผ่ slump flow ดีกว่าเถ้าที่บด 1 ชั่วโมงและเถ้าผสม นอกจากนี้

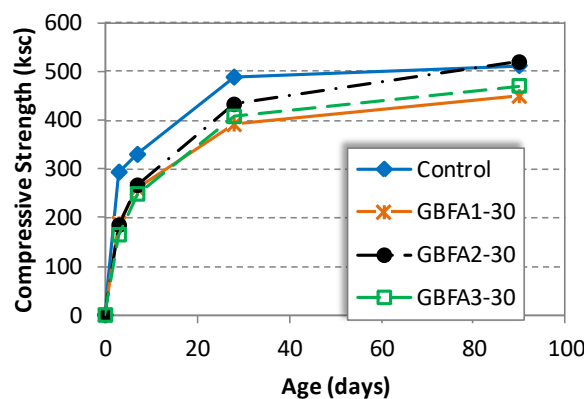
พบว่าเมื่ออัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้น ค่า slump flow และ L-box index มีค่าลดลง แต่เวลาในการไหล t_{50} มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า SCC มีความหนืดมากขึ้น ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [14] และ [20] ซึ่งใช้เถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามลำดับ

5.3 ผลของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลต่อกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัตโนมัติเองผสมเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบดร้อยละ 10 20 และ 30 ได้แสดงในรูปที่ 4(ก) – 4(ค) ตามลำดับ โดยภาพรวมจะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาตามอายุของคอนกรีต โดยเฉพาะในช่วง 28 วันแรก เมื่อพิจารณาผลของปริมาณและความละเอียดของเถ้าชีวมวล จากอัตราส่วนกำลังอัดเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน ดังรูปที่ 5(ก)-(ข) จะเห็นว่า ที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 5(ก)) กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าชีวมวลบด ทั้ง 3 กลุ่ม จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น และการใช้เถ้าชีวมวลบด 2 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าเถ้ากลุ่มอื่น แสดงให้เห็นว่าเถ้าที่มีความละเอียดสูงกว่า สามารถแทรกตัวปิดช่องโพรง (filler effect) ได้ดีกว่า [14-15,17] และเมื่อพิจารณาที่อายุ 90 วัน (รูปที่ 5(ข)) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าคอนกรีตผสมเถ้าชีวมวลบด 2 ชั่วโมง จะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ทุกอัตราการแทนที่ ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าชีวมวลบด 1 ชั่วโมง และคอนกรีตผสมเถ้าชีวมวลผสม ยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชีวมวลที่มีความละเอียดสูงขึ้นไปทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น [14-15,17] จึงทำให้เกิดการพัฒนา กำลังอัดในระยะยาวได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม

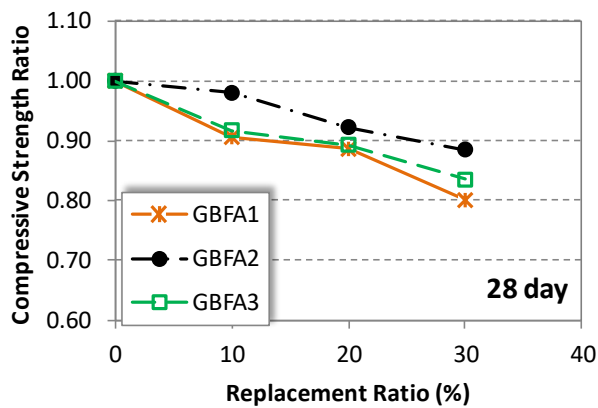


(ก) แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลร้อยละ 10 (ข) แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลร้อยละ 20

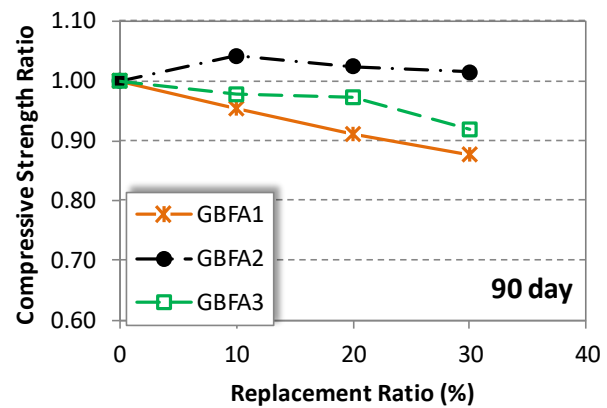


(ค) แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลร้อยละ 30

รูปที่ 4 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลที่บดด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน



(ก) ที่อายุ 28 วัน



(ข) ที่อายุ 90 วัน

รูปที่ 5 ผลของปริมาณและความละเอียดของเถ้าชีวมวลบดที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต SCC

6. สรุปผล

6.1 ระยะเวลาในการบดเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิของเถ้ามีขนาดเล็กลง ช่วยให้ทำหน้าที่เป็นวัสดุแทรกประสาน (filler) และวัสดุปอซโซลานได้ดีขึ้น

6.2 เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง มีองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน ประเภท N

6.3 เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง สามารถใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 10-30) ในการผลิต SCC โดยยังคงสามารถทำให้ค่าดัชนีการไหล ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติของ SCC ตามข้อกำหนดของ EFNARC

6.4 เถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 2 ชั่วโมง จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของ SCC ได้ดีกว่าเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลบด 1 ชั่วโมง

6.5 กำลังรับแรงอัดของ SCC ที่มีส่วนผสมของเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวล จะมีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลสูงขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบดเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวล

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคควาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องบดเถ้าเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khayat, K.H., 1999, "Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete", ACI Mater J, 96 (3), 346-353.
- [2] Okamura, H. and Ouchi, M., 2003, "Self-Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 5-15.
- [3] Alsubari, B., Shafigh, P., Jumaat, Md. Z., 2017, "Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete", Journal of Cleaner Production, 137,

982–996.

- [4] Dehwah, H.A.F., 2012, “Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash”, *Construction and Building Materials*, 26, 547-551.
- [5] Zhao, H., Sun, W., Wu, X., Gao, B., 2015, “The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures”, *Journal of Cleaner Production*, 95, 66-74.
- [6] Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S., Attachaiyawuth, A., 2016, “Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash”, *Construction and Building Materials*, 128, 349-360.
- [7] Siddique, R., Aggarwal, P., Aggarwal, Y., 2012, “Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash”, *Construction and Building Materials*, 29, 73-81.
- [8] Sua-iam, G., Makul, N., 2013, “Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste”, *Journal of Cleaner Production*, 57, 308-319.
- [9] Safiuddin, Md., West, J.S., Soudki, K.A., 2010, “Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash”, *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 708–717.
- [10] Safiuddin, Md., West, J.S., Soudki, K.A., 2012, “Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material”, *Construction and Building Materials*, 30, 833–842.
- [11] Sua-iam, G., Sokrai, P., Makul, N., 2016, “Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, 125, 1028-1034.
- [12] Rukzon, S., Chindapasirt, C., Mahachai, R., 2009, “Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash”, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(2), 242-247.
- [13] Rêgo, J.H.S., Nepomuceno, A.A., Figueiredo, E.P., Hasparyk, N.P., 2015, “Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content”, *Construction and Building Materials*, 80, 56–68.
- [14] Givi, A.N., Abdul Rashid, S., Aziz, F.N. A., Mohd Salleh, M.A., 2010, “Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete”, *Construction and Building Materials*, 24(11), 2145-2150.

- [15] Venkatanarayanan, H.K., Rangaraju, P.R., 2015, “Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 55, 348–363
- [16] Abu Baka, B.H., Ramadhansyah, P.J., Megat Azmi, M.J., 2011, “Effect of rice husk ash fineness on the chemical and physical properties of concrete”, *Magazine of Concrete Research*, 63(5), 313 –320.
- [17] Xu, W., Tommy Lo, Y., Ouyang, D., Memon, S.A., Xing, F., Wang, W., Yuan, X., 2015, “Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste”, *Construction and Building Materials*, 89, 90-101.
- [18] Akram, T., Memon, S.A., Obaid, H., 2009, “Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash”, *Construction and Building Materials*, 23(2), 703-712.
- [19] Safiuddin Md., Isa, M.H.M., Jumaat, M.Z., 2011, *Chiang Mai Journal of Science*, 38(3), 389-404.
- [20] Nagaratnam, B.H., Rahman, M.E., Mirasa, A.K., Mannan, M.A., Lame, S.O., 2016, “Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste”, *Journal of Cleaner Production*, 112, 882-894.
- [21] EFNARC, 2002, “Specification and Guideline for Self-Compacting Concrete”, <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>, [6 มิถุนายน 2560]
- [22] ASTM C618-15, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, <https://www.astm.org/Standards/C618.htm>, [6 มิถุนายน 2560]
- [23] BS EN 12390-3:2009, “Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens”, <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030253049>, [6 มิถุนายน 2560]