การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน เพื่อทำคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูง

ณัฐพงศ์ มกระธัช[1,2*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทสูง วัสดุประสานทำจากส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดกับเถ้าถ่านหินไม่บด (CR-OF) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดกับเถ้าถ่านหินบด (CR-FA) ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ต่อ 70 โดยน้ำหนักตามลำดับ นอกจากนี้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังแทนที่วัสดุประสานในส่วนผสม CR-FA ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CR-FA(10)) ทดสอบค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตสด โดยควบคุมค่าการยุบตัวแบบแผ่ให้อยู่ในช่วง 600 ถึง 800 มิลลิเมตร และทดสอบการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต ทำการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยไม่มีการจี้หรือเขย่าใดๆ เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ผลการวิจัยพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดผสมเถ้าถ่านหินทั้งที่ไม่บดและบดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานเพื่อผลิตคอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทสูงได้ โดยค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตสดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงเท่ากับ 740 ถึง 760 มม. นอกจากนี้คอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีค่าการยุบตัวแบบแผ่ที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน และยังมีการสูญเสียค่ายุบตัวที่น้อยกว่าด้วย คอนกรีต CR-OF และ CR-FA ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 153 และ 225 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ แม้ว่าวัสดุประสานดังกล่าวไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังสามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ โดยคอนกรีต CR-FA(10) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 210 และ 252 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ แม้ว่าคอนกรีตไม่มีการจี้หรือเขย่าใดๆ

คำสำคัญ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าถ่านหิน, สารเร่งกำลัง, การยุบตัวแบบแผ่, การสูญเสียค่ายุบตัว, กำลังอัด

---

[1] ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[2] ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศทางพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[*] ผู้ติดต่อ, อีเมล์: nattapongm@kmutnb.ac.th รับเมื่อ 3 ตุลาคม 2557 ตอบรับเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2557

Use of Calcium Carbide Residue-Fly ash as Binder to Produce High Workability Concrete

Nattapong Makaratat[1,2*]

Abstract

This research aims to use calcium carbide residue and fly ash mixture as a binder instead of using Portland cement in order to produce high workability concrete. The binder used a ratio of 30:70 by weight for ground calcium carbide residue and both original and ground fly ash, CR-OF and CR-FA, respectively. In addition, Portland cement Type I (OPC) was used as strength accelerator at a ratio of 10 percent by weight of the binder, CR-FA(10). The slump flow of all fresh concrete mixtures was determined, and was maintained between 600 to 800 mm. Furthermore, the slump loss of concrete was also determined. The cylindrical concrete specimens, 100 mm in diameter and 200 mm in height, were cast and no required vibration for placing and compaction. The compressive strengths of the concrete were tested at the ages of 3, 7, 28, 60 and 90 days. The results indicated that the calcium carbide residual and fly ash mixture could be used as a binder to produce high workability concrete with slump flow between 740 to 760 mm. In addition, CR-OF, CR-FA, and CR-FA(10) concretes had slump flow higher, and had slump loss lower than that of normal concrete which using Portland cement. The CR-OF and CR-FA concretes gave the compressive strengths of 153 and 225 ksc at 90 days although the binder without using Portland cement, respectively. The use of high fineness of fly ash and OPC strength accelerator can enhance compressive strength gain for calcium carbide residue-fly ash concrete. Although the concrete no required vibration for placing and compaction, the CR-FA(10) concrete had compressive strengths of 210 and 252 ksc at 28 and 90 days, respectively.

Keywords : Calcium carbide residue, Fly ash, Strength accelerator, Slump flow, Slump loss, Compressive strength

[1] Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok.

[2] Center of Excellence in Structural Dynamics and Urban Management, Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok.

[*] Corresponding author, E-mail: nattapongm@kmutnb.ac.th Received 3 October 2014, Accepted 27 November 2014

1. บทนำ

เนื่องจากเทคโนโลยีการก่อสร้างในปัจจุบันต้องตอบสนองความคุ้มค่าในด้านการลงทุนและสอดคล้องกับสภาพเศรษฐกิจที่มีการแข่งขันสูง ทำให้ขนาดชิ้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีขนาดเล็กลงจากเดิมในอดีต เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการใช้งาน หรือลดน้ำหนักของตัวองค์อาคาร และยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย จึงส่งผลให้วิศวกรโครงสร้างต้องใส่เหล็กเสริมที่ค่อนข้างมากในชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดเล็กลง โดยเฉพาะโครงสร้างเสา และผนังรับแรงของอาคารสูงหรืออาคารขนาดใหญ่ โดยทั่วไปการเทคอนกรีตในโครงสร้างเสาและผนังรับแรงมักพบปัญหาการแยกตัวของคอนกรีตสด และการอัดแน่นของคอนกรีตสดก็ทำได้ยาก เพราะโครงสร้างมีเหล็กเสริมค่อนข้างหนาแน่นและมีพื้นที่ในการเทคอนกรีตค่อนข้างแคบหรือจำกัด ในขณะที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างเสาและผนังมีความสูงค่อนข้างมาก จึงส่งผลต่อการควบคุมคุณภาพและทำให้กำลังของคอนกรีตในโครงสร้างดังกล่าวลดลงได้

คอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทสูง เป็นคอนกรีตชนิดหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาการเทคอนกรีตในโครงสร้างเสาหรือผนังรับแรงจากสภาพปัญหาดังกล่าวได้ โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูงมีคุณสมบัติในการไหลได้ดีด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องทำการจี้หรือทำการเขย่าเพื่อให้คอนกรีตไหลเข้าไปในแบบ นอกจากนี้คอนกรีตยังสามารถไหลผ่านเหล็กเสริมที่มีความแน่นหนาได้ดีอีกด้วย โดยไม่เกิดการแยกตัว (Segregation) จากการที่คอนกรีตมีการไหลได้ดีจึงทำให้การเทคอนกรีตทำได้รวดเร็ว ไม่ต้องทำการจี้เขย่า เป็นการลดแรงงานและลดการใช้เครื่องมือในการเทคอนกรีต จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการก่อสร้างที่น้อยกว่าการใช้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทแบบธรรมดา และทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งโรงงานนำก๊าซอะเซทิลีนไปใช้ในอุตสาหกรรมงานเชื่อมหรือตัดโลหะ แคลเซียมคาร์ไบด์เมื่อผสมกับน้ำได้ผลผลิตเป็นก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในรูปน้ำโคลนข้น มีความเป็นด่างสูง ดังสมการเคมีที่ (1)

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2 \quad (1)$$

จากสมการเคมีที่ (1) เห็นได้ว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นหลัก มีลักษณะเป็นโคลนเหลวสีเทาอมขาว ในแต่ละปีมีปริมาณการทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานแห่งหนึ่งสูงถึง 1000 ตัน/เดือน หรือปริมาณ 12000 ตัน/ปี [1] ซึ่งไม่สามารถนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากทิ้งบริเวณโรงงาน ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะและส่งกลิ่นเหม็น ซึ่งแสดงในรูปที่ 1

เถ้าถ่านหิน จัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องทั้งในและต่างประเทศ [2-3] เถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในจังหวัดลำปาง ซึ่งอยู่บริเวณทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) มีระบบการเผาแบบ (Pulverized coal combustion) อุณหภูมิที่ใช้ในการ

เผาประมาณ 1,000-1,500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีทรงกลมตัน จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการเทของคอนกรีตสด และลดปัญหาการแยกตัวของคอนกรีตสดได้ดี

รูปที่ 1 แสดงบริเวณพื้นที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการนำเถ้าถ่านหินมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงสามารถทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการเทที่สูงได้ [4-6] สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วัสดุประสานชนิดใหม่ ซึ่งทำจากส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ่าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตคอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทสูง โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของวัสดุประสานหลัก นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง โดยใช้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นปฏิกิริยาในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทสูงชนิดใหม่นี้

2. วัตถุประสงค์

2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินใช้เป็นวัสดุประสานในการทำคอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทสูง โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์

2.2 ศึกษาความสามารถในยุบตัวแบบแผ่ (Slump flow ability) และความสามารถในการยุบตัวแบบแผ่ด้วยการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Passing ability) ของคอนกรีต โดยไม่เกิดการแยกตัว (Segregation resistance) ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [7] และ ASTM C1621 [8] ตามลำดับ

2.3 ศึกษาการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump loss)

2.4 ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินและการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

3. วิธีการศึกษา

3.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด (CR) โดยมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.42

- เถ้าถ่านหินแม่เมาะจากโรงงานไฟฟ้าโดยตรง (OF) มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 28.9 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.33 และเถ้าถ่านหินที่ผ่านการบดละเอียด (FA) มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกิน ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62

- ทรายแม่น้ำ ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.28

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ใช้เร่งปฏิกิริยาเคมี

- หินปูนย่อยมีขนาดไม่เกิน 12 มม. มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.50

- สารลดน้ำพิเศษ Type F ตามมาตรฐาน ASTM C 494 [9]

- น้ำประปา

3.2 วิธีการผสมและอัตราส่วนผสมคอนกรีต

นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด (CR) มาผสมกับเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรง (OF) และผสมกับเถ้าถ่านหินบดละเอียด (FA) โดยมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นสารเร่งกำลังในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้สัดส่วนระหว่าง CR:OF และ CR:FA เท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 650 กก./ม.^{3} ใช้ค่า W/B เท่ากับ 0.30 โดยควบคุมค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 600 ถึง 800 มม. ทำการผสมคอนกรีตโดยใช้เครื่องผสมแบบกะทะหมุน ใส่วัสดุประสานเข้าไปในเครื่องผสมแล้วผสมให้เข้ากันก่อน จากนั้นเดินเครื่องนาน 1 นาทีพร้อมกับเติมน้ำที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ แล้วตามด้วยทรายอีก 1 นาที จากนั้นจึงใส่หินแล้วทำการผสม 3 นาที พัก 1 นาที เดินเครื่องต่ออีก 2 นาที เพื่อให้ส่วนผสมคอนกรีตเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน อัตราส่วนผสมของคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 1

3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

CR หมายถึง กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด

OF หมายถึง เถ้าถ่านหินไม่บด

FA หมายถึง เถ้าถ่านหินบด

SP หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ

NC หมายถึง คอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

CR-OF หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ CR ร้อยละ 30 OF ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสาน

CR-FA หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ CR ร้อยละ 30 FA ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสาน

CR-FA (10) หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ CR ร้อยละ 30 FA ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสาน โดยใช้ OPC เป็นสารเร่งกำลังร้อยละ 10 แทนที่โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

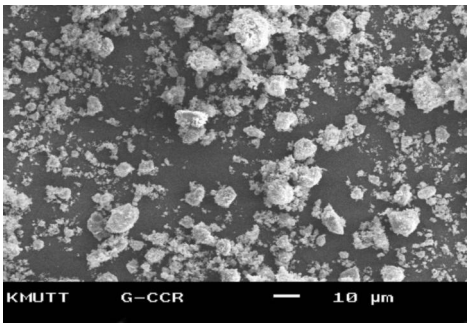
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Concretes	Mix Proportions (kg/m^3)								W/B
	CR	OF	FA	OPC	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water	SP (1.4%)	
CR-OF	195	455	-	-	780	635	195	9.1	0.30
CR-FA	195	-	455	-	790	640	195	9.1	0.30
CR-FA(10)	175.5	-	409.5	65	800	650	195	9.1	0.30
NC	-	-	-	650	850	696	195	9.1	0.30

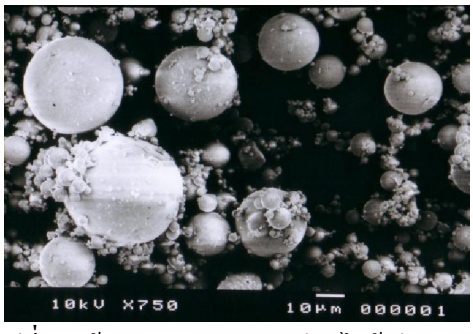
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

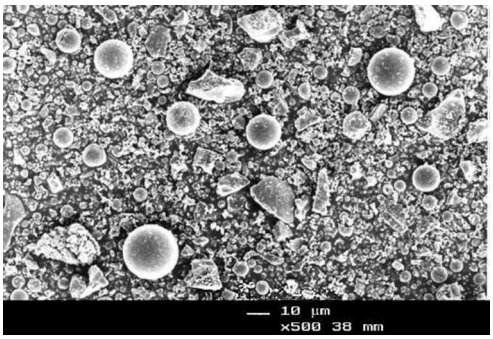
รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด (รูปที่ 2a) มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุมและมีพื้นผิวขรุขระ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.4 ไมครอน สำหรับเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าโดยตรง (รูปที่ 2b) มีลักษณะรูปร่างทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่กระจายกันอยู่โดยทั่วไป โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าประมาณ 28.9 ไมครอน ส่วนเถ้าถ่านหินบดละเอียดเห็นได้ชัดว่าอนุภาคถูกบดจนแตกออกเป็นเหลี่ยมมุม แต่ยังมีอนุภาคทรงกลมกระจายตัวอยู่ทั่วไป ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าประมาณ 6 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2c



รูปที่ 2a กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดละเอียด



รูปที่ 2b เถ้าถ่านหินแม่เมาะจากโรงไฟฟ้าโดยตรง



รูปที่ 2c เถ้าถ่านหินแม่เมาะบดละเอียด

4.2 องค์ประกอบทางเคมี

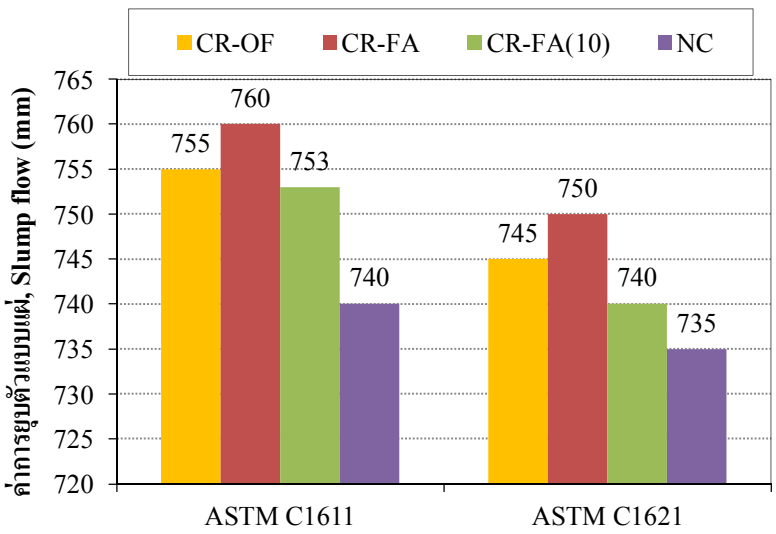
ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมี CaO เป็นองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 56.5 ขององค์ประกอบเคมีทั้งหมด อย่างไรก็ตามกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณ LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 36.1 ซึ่งค่า LOI ที่สูงของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบหาค่า LOI มีค่าสูงประมาณ 950-1000 องศาเซลเซียส ทำให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งอยู่ในรูปของ $Ca(OH)_2$ สลายตัวเป็นก๊าซ H_2O และระเหยออกไป [10] สำหรับเถ้าถ่านหินทำการทดสอบเฉพาะวัสดุที่ทำการบดเท่านั้น เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุด้วยการบดไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินทั้งก่อนและหลังทำการบดมีค่าความแตกต่างมากนัก [11] เถ้าถ่านหินบดมีผลรวมของ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 73.9 มีปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 13.7 และมี LOI เท่ากับ ร้อยละ 0.1 ซึ่งสามารถจัดเถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [12] ได้

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

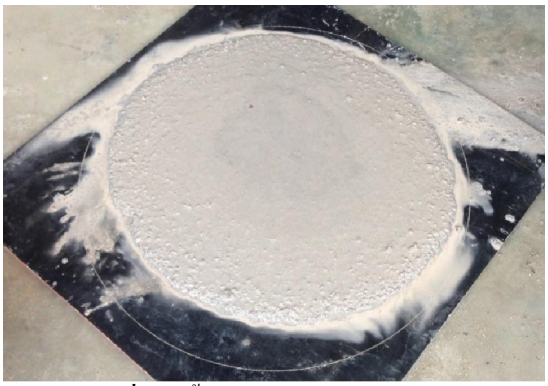
Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_2	CaO	SO_3	LOI (%)
CR	4.3	0.4	0.9	56.5	0.1	36.1
FA	42.9	19.2	11.8	13.7	3.0	0.1

4.3 ความสามารถในการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1611

ค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Slump flow test ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 ได้แสดงในรูปที่ 3 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตสดที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานมีความสามารถในการยุบตัวแบบแผ่ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยคอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) ให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการยุบตัวแบบแผ่เท่ากับ 755, 760 และ 753 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต NC มีค่าการยุบตัวแบบแผ่ เท่ากับ 740 มม. ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีลักษณะทรงกลมตัน ทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตสดได้ดี นอกจากนี้ความละเอียดที่สูงของเถ้าถ่านหินส่งผลให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการไหลแผ่ได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคใหญ่หรือเถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรง เป็นที่น่าสังเกตุว่าคอนกรีต NC ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานมีค่าการไหลแผ่ที่น้อยที่สุด เพราะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีรูปทรงที่ไม่แน่นอนจึงทำให้เนื้อคอนกรีตสดไหลแผ่ได้น้อยกว่า รูปที่ 4a-4c ได้แสดงลักษณะของเนื้อคอนกรีตสดหลังจากที่คอนกรีตสดหยุดการไหลแผ่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเนื้อของคอนกรีตสด CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและไม่เกิดการแยกตัวของซีเมนต์เพสต์หรือมวลรวมแต่อย่างใด



รูปที่ 3 ค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีต



รูปที่ 4a เนื้อของคอนกรีตสด CR-OF

รูปที่ 4b เนื้อของคอนกรีตสด CR-FA

รูปที่ 4c เนื้อของคอนกรีตสด CR-FA(10)

4.4 ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1621

ค่าการยุบตัวแบบแผ่โดยการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Passing ability) ของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1621ได้แสดงในรูปที่ 3 ผลการทดสอบพบว่าค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตสดทุกส่วนผสมมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อคอนกรีตไหลผ่านสิ่งกีดขวาง J-Ring นอกจากนี้ผลการทดสอบยังสอดคล้องกับการทดสอบค่าการยุบตัวแบบแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C1611 โดยคอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีค่าการยุบตัวแบบแผ่ที่สูงกว่าคอนกรีต NC สำหรับคอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) ให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการยุบตัวแบบแผ่ เท่ากับ 745, 750 และ 740 มม. ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต NC มีค่าการยุบตัวแบบแผ่ เท่ากับ 735 มม. เป็นที่น่าสังเกตุว่าแม้ว่าคอนกรีตสดต้องทำการไหลแผ่ผ่านสิ่งกีดขวางแต่ค่าการยุบตัวแบบแผ่มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินมีประสิทธิภาพที่ดีในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับทำคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูงได้ สำหรับการสังเกตุเนื้อคอนกรีตสดหลังการทดสอบ ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5a-5c พบว่า คอนกรีตสด CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและไม่เกิดการแยกตัวของซีเมนต์เพสต์หรือมวลรวมแต่อย่างใด

4.5 ระยะเวลาในการไหลแผ่ของคอนกรีตสด

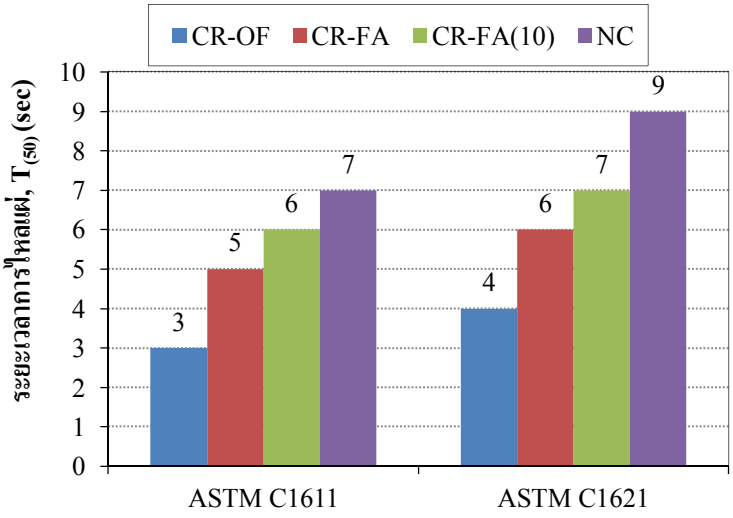
รูปที่ 6 แสดงระยะเวลาในการไหลแผ่ของคอนกรีตสดเมื่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. ทำการทดสอบทั้ง flow ability และ passing ability ของคอนกรีต

รูปที่ 5a เนื้อของคอนกรีตสด CR-OF

รูปที่ 5b เนื้อของคอนกรีตสด CR-FA

รูปที่ 5c เนื้อของคอนกรีตสด CR-FA(10)

ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาในการไหลแผ่ของคอนกรีตสดเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 (Slump flow ability) ให้ค่าระยะเวลาการไหลแผ่ที่น้อยกว่าวิธีทดสอบตาม ASTM C1621 (Passing ability) ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตสดต้องไหลผ่านสิ่งกีดขวางจึงทำให้ระยะเวลาในการไหลแผ่นานขึ้น นอกจากนี้คอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีระยะเวลาในการไหลแผ่ที่น้อยกว่าคอนกรีต NC ทั้งวิธีทดสอบตาม ASTM C1611 และ ASTM C1621 โดยคอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีระยะเวลาในการไหลแผ่เท่ากับ 3, 5, 6 และ 4, 6, 7 วินาที เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 และ ASTM C1621 ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต NC ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน มีระยะเวลาในการไหลแผ่ที่นานกว่า คือเท่ากับ 7 และ 9 วินาที เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 และ ASTM C1621 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินมีประสิทธิภาพในการไหลแผ่ที่ดีและรวดเร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (คอนกรีต NC) นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาในการไหลแผ่ที่ทดสอบทั้งมาตรฐาน ASTM C1611 และ ASTM C1621 ในคอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีระยะเวลาในการไหลแผ่ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานใช้ระยะเวลาในการไหลแผ่ของคอนกรีต อยู่ในช่วง น้อยกว่า 7 วินาที ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, EFNARC [13] และยังชี้ให้เห็นว่าส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้ทำคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูงได้



รูปที่ 6 ระยะเวลาการไหลแผ่ของคอนกรีตสด

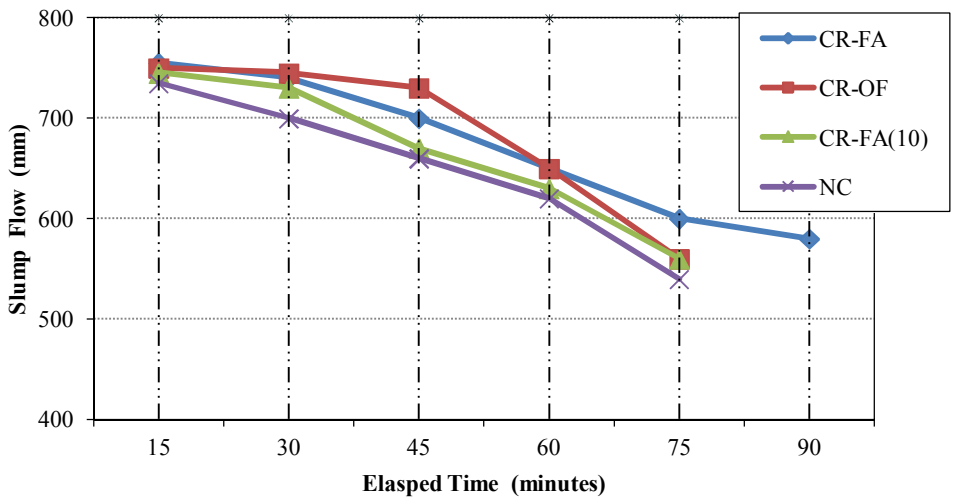
4.6 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump loss)

ทำการทดสอบในช่วงเวลาเดียวกัน ที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 30-33 องศาเซลเซียส นำคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วมาหาค่าการยุบตัวแบบแผ่เริ่มต้น จากนั้นเทคอนกรีตกลับใส่โม่ผสมทิ้งไว้ โดยปิดฝาโม่ไม่ให้น้ำระเหยออก และเปิดเครื่องผสมเป็นระยะๆ ทำการหาค่ายุบตัวแบบแผ่และบันทึกผลทุกๆ 15 นาที จนค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า 600 มม. รูปที่ 7 แสดงการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ระยะเวลาต่างๆ ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต NC มีการสูญเสียค่ายุบตัวที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ผสมเถ้าถ่านหิน โดยคอนกรีต NC มีการสูญเสียค่ายุบตัว เท่ากับ 735, 700, 660, 620 และ 540 มม. ใช้เวลาเท่ากับ 75 นาที จากเวลาผสมแล้วเสร็จ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน ทำให้เกิดการดึงน้ำในส่วนผสมไปทำปฏิกิริยา จึงส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตสดมีความเหนียวข้น ความสามารถในการเทของคอนกรีต NC จึงมีค่าน้อยกว่า

คอนกรีต CR-OF มีค่าการสูญเสียค่ายุบตัว เท่ากับ 750, 745, 730, 650 และ 560 มม.ใช้เวลาเท่ากับ 75 นาที จากเวลาผสมแล้วเสร็จ ซึ่งใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวเท่ากับคอนกรีต NC แต่คอนกรีต CR-OF มีการสูญเสียค่าการยุบตัวที่น้อยกว่าคอนกรีต NC เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเกิดขึ้นได้ช้าโดยธรรมชาติ [14] จึงทำให้วัสดุประสานดึงน้ำในส่วนผสมคอนกรีตไปใช้อย่างช้าๆ ส่งผลให้สูญเสียค่ายุบตัวที่น้อยกว่า นอกจากนี้กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอนุภาคที่กลมของเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้เป็นการส่งเสริมความสามารถในการเทของคอนกรีตให้สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Makaratat และคณะ [15] ซึ่งพบว่าอนุภาค

ทรงกลมตันของเถ้าถ่านหินสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการเทของคอนกรีตได้

คอนกรีต CR-FA มีการสูญเสียค่าการยุบตัว เท่ากับ 755, 740, 700, 650, 600 และ 580 มม. ใช้เวลาเท่ากับ 90 นาทีหลังจากผสมคอนกรีตแล้วเสร็จ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต CR-FA มีค่าน้อยที่สุด และใช้เวลานานกว่าคอนกรีต NC และ CR-OF ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาคของแคลเซียมคาร์ไบด์บดและเถ้าถ่านหินบดมีขนาดที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าถ่านหินไม่บด นอกจากนี้เถ้าถ่านหินบดยังมีส่วนของอนุภาคทรงกลมเหลืออยู่ จึงทำให้วัสดุประสานดึงน้ำในส่วนผสมไปใช้เพื่อทำปฏิกิริยาน้อย และขนาดอนุภาคทรงกลมของเถ้าถ่านหินบดยังส่งเสริมให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นการยืนยันงานวิจัยของ Sata และคณะ [16] ที่รายงานว่าการบดเถ้าถ่านหินให้มีขนาดอนุภาคละเอียดสามารถลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวม จึงทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติการเทสูงขึ้น สำหรับการทดสอบการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต CR-FA(10) พบว่ามีค่าเท่ากับ 745, 730, 670, 630 และ 560 มม. ใช้เวลาเท่ากับ 75 นาทีหลังจากผสมคอนกรีตแล้วเสร็จ โดยคอนกรีต CR-FA(10) มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลัง อยู่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จึงเป็นการเพิ่มความต้องการน้ำในส่วนผสมที่ต้องใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน เนื้อคอนกรีตจึงมีความเหนียวข้นกว่าส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต CR-FA(10) มากกว่าคอนกรีต CR-OF และ CR-FA แต่ยังให้การสูญเสียค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีต NC เนื่องจากคอนกรีต CR-FA(10) มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียง 65 กก./ม.^{3}

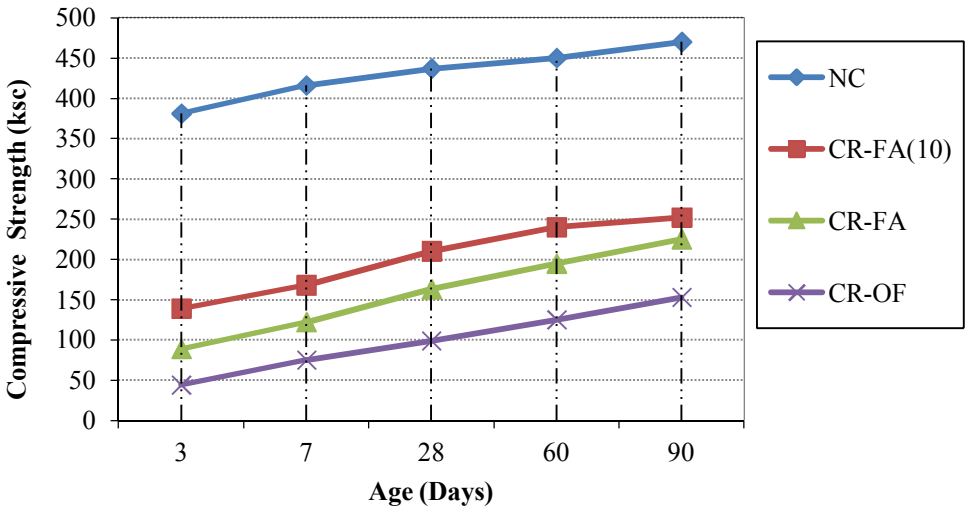


รูปที่ 7 ค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ระยะเวลาต่างๆ

4.7 กำลังอัดของคอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุในการบ่ม ได้แสดงในรูปที่ 8 ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน (NC) ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน โดยคอนกรีต NC ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 381, 416, 437, 450 และ 470 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 153 ถึง 252 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 90 วัน สาเหตุที่คอนกรีต NC ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานล้วนให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าเพราะคอนกรีต NC มีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ในขณะที่คอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นหลัก ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง แต่เกิดขึ้นได้ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยธรรมชาติ [14] แม้ว่าคอนกรีต CR-OF ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ในส่วนผสม และไม่มีการจี้หรือเขย่าให้เข้าแบบหล่อแต่อย่างใด คอนกรีต CR-OF ยังให้ค่ากำลังอัด เท่ากับ 44, 75, 99, 125 และ 153 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงขึ้นผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต CR-FA พบว่าคอนกรีต CR-FA ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการใช้เถ้าถ่านหินไม่บดในคอนกรีต CR-OF โดยคอนกรีต CR-FA ให้ค่ากำลังอัด เท่ากับ 89, 122, 163, 195 และ 225 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Makaratat และคณะ [17] ที่พบว่าการบดเถ้าถ่านหินให้มีความละเอียดสูงขึ้นผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าการใช้เถ้าถ่านหินไม่บด สำหรับการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราการแทนที่วัสดุประสาน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นกว่าการไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง โดยคอนกรีต CR-FA(10) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 139, 168, 210, 240 และ 252 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ เป็นเพราะว่าคอนกรีต CR-FA(10) สามารถพัฒนากำลังอัดได้จากทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน และปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้เป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติการเทสูงได้ โดยส่วนผสมดังกล่าวให้ค่าการยุบตัวแบบแผ่ที่สูง มีระยะเวลาในการไหลแผ่ที่รวดเร็ว และให้ค่ากำลังอัดที่สามารถนำไปใช้งานได้ โดยคอนกรีตดังกล่าวไม่ต้องทำการจี้หรือเขย่าให้เข้าแบบแต่อย่างใด นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ยังเป็นคอนกรีตที่ผลิต CO_2 ต่ำ เนื่องจากไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน หรือใช้ปูนซีเมนต์ที่น้อยมากเพียง 65 กก./ม.^{3} เท่านั้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุในการบ่ม

5. สรุปผล

ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีตที่คุณสมบัติการเทสูงได้ โดยคอนกรีตให้กำลังอัดที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 99-163 กก./ซม.^{2} และเพิ่มขึ้นเป็น 153-225 กก./ซม.^{2} ที่ 90 วัน แม้ว่าวัสดุประสานไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานให้ค่าการยุบตัวแบบแผ่ที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 (Slump flow ability) และ ASTM C1621 (Passing ability) โดยค่าการไหลแผ่คอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีค่าอยู่ในช่วง 740-760 มม. คอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) ให้ค่าระยะเวลาในการไหลแผ่ของคอนกรีตสด $T_{(50)}$ อยู่ในช่วง 3-7 วินาที ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EFNARC ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนมีค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสด $T_{(50)}$ อยู่ในช่วง 7-9 วินาที คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน เป็นวัสดุประสานมีการสูญเสียค่ายุบตัวที่น้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยคอนกรีต CR-FA มีการสูญเสียค่ายุบตัวที่น้อยที่สุด และใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวนานกว่าคอนกรีต CR-OF, CR-FA(10) และ NC การบดเถ้าถ่านหินให้มีความละเอียดสูงขึ้นส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานมีค่าสูงขึ้น การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราการแทนที่ในวัสดุประสาน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้คอนกรีต CR-FA(10) มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นกว่าการไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง โดยที่ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัด เท่ากับ 210 กก/ซม^2 และที่ 90 วัน ให้ค่ากำลังอัด เท่ากับ 252 กก/ซม^2

6. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Makaratat, T. Laosamathikul, C. Jaturapitukkul, "Utilization of Calcium Carbide Residue-Fly ash Mixture as a Cementing Material in Concrete", The 33rd International Association for bridge and structural engineering, IABSE SYMPOSIUM, Bangkok, 2009, 96, pp. 144-145.

[2] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Threshold Chloride Content of Fly Ash Concrete under Marine Environment", The Journal of Industrial Technology, 2011, 7 (1), pp. 21-28. (in Thai)

[3] S. Taebuanhuad, U. Rattanasak, S. Jenjirapanya, "Strength Behavior of Fly Ash Geopolymer with Microwave Pre-radiation Curing", The Journal of Industrial Technology, 2012, 8 (2), pp. 1-8. (in Thai)

[4] N. Bouzoubaa and M. Lachemi, "Self-compacting Concrete Incorporating High-Volumes of Class F Fly ash Preliminary Results", Cement and Concrete Research, 2001, 31 (3), pp. 413-420.

[5] M. Nehdi, M. Pardhan, S. Koshowski. "Durability of Self-Consolidating Concrete Incorporating High-Volume Replacement Composites Cement", Cement and Concrete Research, 2004, 34 (11), pp. 2103-2012.

[6] E. Guneyisi, M. Gesoglu, E. Ozbay, "Strength and Drying Shrinkage Properties of Self-compacting Concretes Incorporating Multi-System Blended Mineral Admixtures", Construction and Building Materials, 2010, 24 (10), pp. 1878-1887.

[7] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 1611-1611M-05: Standard Test Method for Slump Flow of Self- Consolidating Concrete", In Annual Book of ASTM Standards, 2012, 6 pages.

[8] American Society for Testing and Materials, "ASTM C1621/C1621M-06: Standard Test Method for Passing Ability of Self- Consolidating Concrete", In Annual Book of ASTM Standards, 2012, 4 pages.

[9] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 494/C494M-10: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", In Annual Book of ASTM Standards, 2012, 10 pages.

[10] C. Jaturapitakkul and B. Roongreung, "Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash", Journal of materials in Civil Engineering, ASCE, 2003, 15 (5), pp. 470-475.

[11] E. Angsuwattana, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, T. Ketratanabovorn, "Use of Classified Mae Moh Fly ash in High Strength Concrete", In: Proceedings of the 6th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete, Bangkok, Thailand, 1998, pp. 49-60.

[12] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 618-08a: Standard Test Method for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", In Annual Book of ASTM Standards, 2012, 4 pages.

[13] EFNARC, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete", The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005, 63 pages.

[14] S.A. Khedr and M.N. Abou-zeid, "Characteristics of Silica-Fume Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1994, 6 (3), pp. 357-375.

[15] N. Makaratat, C. Jaturapitakkul, C. Namarak, V. Sata, "Effects of Binder and $CaCl_2$ Contents on the Strength of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Concrete", Cement and Concrete Composites, 2011, 33 (3), pp. 436-443.

[16] V. Sata, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, "Influence of Pozzolan from Various By-Product Materials on Mechanical Properties of High-Strength Concrete", Construction and Building Materials, 2007, 21 (7), pp. 1589-1598.

[17] N. Makaratat, C. Jaturapitakkul, T. Laosamathikul, "Effects of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Binder on Mechanical Properties of Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2010, 22 (11), pp. 1164-1170.