

กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

Compressive Strength, Elastic Modulus and Poisson's Ratio of Rapid Hardening Concrete

สมพร งามทวี^{1*} รุ่งโรจน์ อยุรอด² นราศักดิ์ แสนกล้า³ กริชมากรณ์ มูลเสนา⁴ ศศคุณ เดชพันธ์⁵ ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ⁶ และ ธนากร ภูเงินจำ⁷

^{1,2,3,4,5,7} หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.นครราชสีมา

⁶ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: somporn.ng36@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้าและซิลิกาฟุ่ม โดยใช้สัดส่วนของเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อกากดินล้าต่อซิลิกาฟุ่มเท่ากับ 100:0:0, 90:10:0, 90:5:5, 80:20:0, 80:15:5, 80:10:10, 70:30:0, 70:25:5, 70:20:10 และ 70:15:15 ตามลำดับ งานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ เป็นสารละลายต่างในส่วนผสม โดยทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว ผลการทดสอบ พบว่าการใช้กากดินล้าแทนเถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับการผลิตคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่ม จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้าร้อยละ 10 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

คำสำคัญ: คอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว, เถ้าลอยแคลเซียมสูง, กากดินล้า, ซิลิกาฟุ่ม, สมบัติเชิงกล

Abstract

This article aims to study the compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio of rapid hardening concrete made from high-calcium fly ash incorporated with clay residue (CR) and silica fume (SF). The FA:CR:SF ratios were 100:0:0, 90:10:0, 90:5:5, 80:20:0, 80:15:5, 80:10:10, 70:30:0, 70:25:5, 70:20:10 and 70:15:15, respectively. Sodium silicate solution with 10 molar sodium hydroxide solution were used as alkaline solutions in the mixture. The setting time, compressive strength, modulus of elasticity, and Poisson's ratio of rapid hardening concrete were investigated. Test results found that the usage of CR to replace FA for manufacturing rapid hardening concrete could delay its setting time. The compressive strength and elastic modulus of

FA rapid hardening concrete tended to decrease with an increase in both CR and SF. It can be concluded that rapid hardening concrete made from FA with 10%CR was a marginal increase compared to the control mix.

Keywords: Rapid hardening concrete, High-calcium fly ash, Clay residual, Silica fume, Mechanical properties

1. บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศปริมาณมาก และปัญหาการกำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม ทำให้เกิดแรงกระตุ้นในการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าวที่เพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นวัสดุใหม่มากขึ้น โดยใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์หรือลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงหนึ่งในนั้นคือ วัสดุอัลคาไล [1]

วัสดุอัลคาไลสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่เป็นต่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำให้เกิดปฏิกิริยาและเกิดการแข็งตัวและสามารถรับกำลังได้ วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย เถ้ากลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าขานอ้อย เป็นต้น [1, 2]

ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมที่มีปริมาณสูงเป็นหลัก จากรายงานวิจัย พบว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลีเมอร์ [3] อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตคอนกรีตยังคงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น กระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบเสริมที่มีองค์ประกอบของซิลิกาเข้ามาทำปฏิกิริยาร่วมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง เพื่อให้ได้ผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสารประกอบนี้มีสมบัติในการยึดประสานมากขึ้นภายในระบบของวัสดุอัลคาไล

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การใช้ซิลิกาฟุ่มหรือไมโครซิลิกาที่มีปริมาณของซิลิกามากกว่าร้อยละ 90 ผสมในคอนกรีตทำให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้น เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงมากทำให้สามารถลดค่าความพรุนและเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ได้มากขึ้น [4] นอกจากนี้วัสดุอีกหนึ่งชนิดที่มีปริมาณของซิลิกาสูง คือ กากดินล้าง ซึ่งจากข้อมูลกระบวนการผลิตเซรามิก วัสดุดิบที่ใช้จะเป็นดินขาวซึ่งมีปริมาณของซิลิกามากกว่าร้อยละ 45 [5] จึงน่าจะเป็นแหล่งให้ซิลิกาที่น่าสนใจสำหรับการผลิตคอนกรีต

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟุ่ม ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟุ่มและเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาคอนกรีตที่มีการก่อตัวเร็วใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมต่อไปในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และกากดินล้าง (CR) จากกระบวนการผลิตเซรามิก จังหวัดลำปาง และซิลิกาฟุ่ม องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้าง และซิลิกาฟุ่มดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าเถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก ซึ่งปริมาณผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ เท่ากับ 60.92 เปอร์เซ็นต์ และ CaO เท่ากับ 25.79 เปอร์เซ็นต์ เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จึงจัดอยู่ในเถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [6] ส่วนกากดินล้างและซิลิกาฟุ่มประกอบด้วยซิลิกาเป็นหลัก ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาด 3/8 นิ้ว

สารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีของ Na₂O เท่ากับร้อยละ 12.37, SiO₂ เท่ากับร้อยละ 29.94 และ H₂O เท่ากับร้อยละ 57.69 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้าง และซิลิกาฟุ่ม

Chemical compositions	FA (%)	CR (%)	SF (%)
SiO ₂	31.32	77.48	92.00
Al ₂ O ₃	13.96	9.74	0.70
Fe ₂ O ₃	15.64	2.43	1.20
CaO	25.79	0.54	0.20
MgO	2.94	0.02	0.20
Na ₂ O	2.83	0.01	0.40
K ₂ O	2.93	5.61	0.10
SO ₃	3.29	1.01	-

LOI	1.30	1.51	-
-----	------	------	---

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว (kg/m³)

สัญลักษณ์	FA	CR	SF	NH	NS	RS	CA
100FA0CR0SF	427	-	-	118	118	489	1201
90FA10CR0SF	385	43	-	118	118	490	1202
90FA5CR5SF	385	21	21	118	118	489	1199
80FA20CR0SF	342	85	-	118	118	491	1204
80FA15CR5SF	342	64	21	118	118	489	1201
80FA10CR10SF	342	43	43	118	118	488	1198
70FA30CR0SF	299	128	-	118	118	491	1206
70FA25CR5SF	299	107	21	118	118	490	1203
70FA20CR10SF	299	85	85	118	118	489	1199
70FA15CR15SF	299	64	64	118	118	488	1196

2.2 อัตราส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วแสดงในตารางที่ 2 โดยใช้สัดส่วนของเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อกาก ดินล้างต่อซิลิกาฟุ่มเท่ากับ 100:0:0, 90:10:0, 90:5:5, 80:20:0, 80:15:5, 80:10:10, 70:30:0, 70:25:5, 70:20:10 และ 70:15:15 ตามลำดับ ในการผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0 และใช้สารพลาสติกไซเซอร์ (SP) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ขั้นตอนการผสมคอนกรีตประกอบด้วย การผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้างและซิลิกาฟุ่มให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ผสมเป็นเวลา 1 นาที เติมมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบผสมเป็นเวลา 1 นาที และเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารพลาสติกไซเซอร์ ผสมอีกครั้งให้เข้ากันประมาณ 1 นาที การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วแสดงในรูปที่ 1



(ก) การบรรจุคอนกรีต



รูปที่ 1 ลักษณะการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องควบคุมรูปที่ 1 วิธีเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว



รูปที่ 2 การทดสอบกำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

2.3 เตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทลงแบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร และกระทุ้งตามมาตรฐาน ASTM C39 [7] แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมงหลังจากการเทตัวอย่างลงแบบ จากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1x และเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ววิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C39 [7] ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C469 [8] ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหาได้จากสมการ (1) และอัตราส่วนปัวซองหาได้จากสมการ (2)

$$E = \frac{S_1 - S_2}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\epsilon_{1,2} - \epsilon_{1,1}}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (2)$$

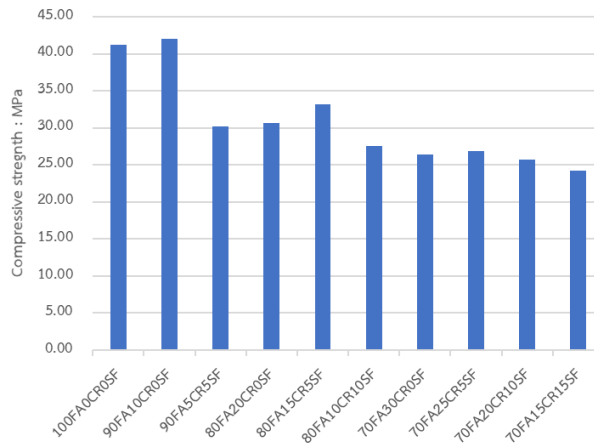
เมื่อ E หมายถึง โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (GPa), S_2 หมายถึง ความเค้นอัดของคอนกรีตที่ร้อยละ 40 ของกำลังอัดประลัย (MPa), S_1 หมายถึง ค่าความเค้นอัดที่เกิดความเค้น 0.00005 (MPa), ϵ_2 หมายถึง ค่าความเครียดที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ S_2 , μ หมายถึง ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต, $\epsilon_{1,2}$ หมายถึง ค่าความเครียดด้านข้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่างคอนกรีตเมื่อมีความเค้นเท่ากับ S_2 , $\epsilon_{1,1}$ หมายถึง ค่าความเครียดด้านข้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่างคอนกรีตเมื่อมีความเค้นเท่ากับ S_1

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้าและซิลิกาฟุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าการใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาในระบบของการผลิตคอนกรีต จากการที่ใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มในส่วนผสมเกินปริมาณที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต อีกทั้งซิลิกาจากกากดินล้าเป็นซิลิกาที่ไม่มีความว่องไวมากเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซิลิกาจากเถ้าลอย ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นเพื่อให้ได้ผลผลิตโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) หรือจีโอโพลิเมอร์เจลน้อยกว่า [9] แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของซิลิกาจากกากดินล้าและซิลิกาฟุ่มน่าจะช่วยการทำปฏิกิริยาในช่วงอายุปลายทำนองเดียวกับปฏิกิริยาปอซโซลานของระบบซีเมนต์ปกติ [10] ซึ่งผลการทดสอบตามรูปที่ 3 เป็นการทดสอบของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุเพียง 7 วัน ซึ่งเป็นไปได้ว่ากำลังอัดช่วงต้นของการใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มในส่วนผสมของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะช้ากว่าเมื่อพิจารณาการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงในส่วนผสมเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ควรต้องมีการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้าและซิลิกาฟุ่มในอายุปลายเพิ่มเติม

นอกจากนี้จากรูปที่ 3 ยังพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้าร้อยละ 10 (ส่วนผสม 90FA10CROSF) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสามารถให้ค่ากำลังอัดสูงถึง 42.0 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ส่วนผสม 100FA0CROSF) ที่ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.2 เมกะปาสคาล อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณการแทนที่ด้วยกากดินล้าที่ร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต



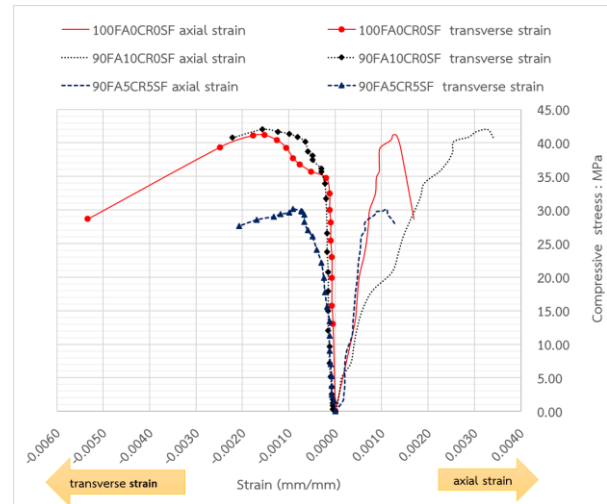
รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุบ่มเท่ากับ 7 วัน

ตารางที่ 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุบ่มเท่ากับ 7 วัน

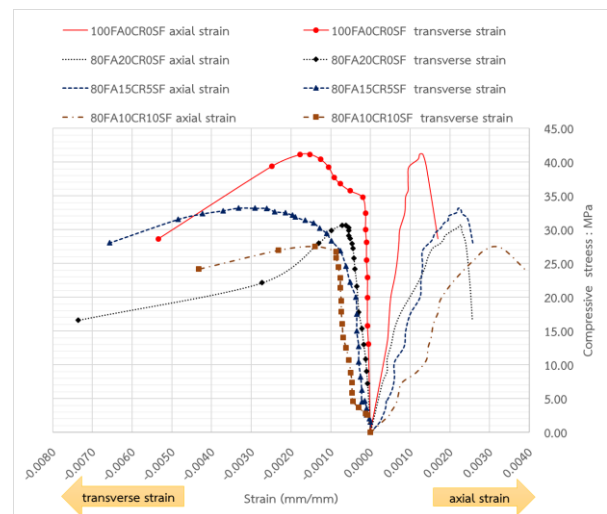
Symbol	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's ratio
100FA0CR0SF	34.4	0.26
90FA10CR0SF	30.9	0.28
90FA5CR5SF	22.5	0.20
80FA20CR0SF	25.0	0.25
80FA15CR5SF	15.0	0.23
80FA10CR10SF	7.6	0.33
70FA30CR0SF	19.3	0.26
70FA25CR5SF	16.0	0.25
70FA20CR10SF	14.8	0.18
70FA15CR15SF	15.7	0.21

3.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากถั่วลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล่างและซิลิกาฟุ่มดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่า การใช้กากดินล่างและซิลิกาฟุ่มแทนที่ถั่วลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตจากถั่วลอยแคลเซียมสูง (รูปที่ 3) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจากถั่วลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล่างและซิลิกาฟุ่ม (รูปที่ 4-6) ซึ่งการแทนที่ด้วยกากดินล่างและซิลิกาฟุ่มในถั่วลอยแคลเซียมสูงเพื่อคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว พบว่า เส้นความชันมีแนวโน้มลดลงซึ่งการที่ความชันลดลงและความเครียดเพิ่มขึ้นแสดงถึงคอนกรีตจะมีความเหนียวมากขึ้นและเป็นข้อดีของโครงสร้างคอนกรีต



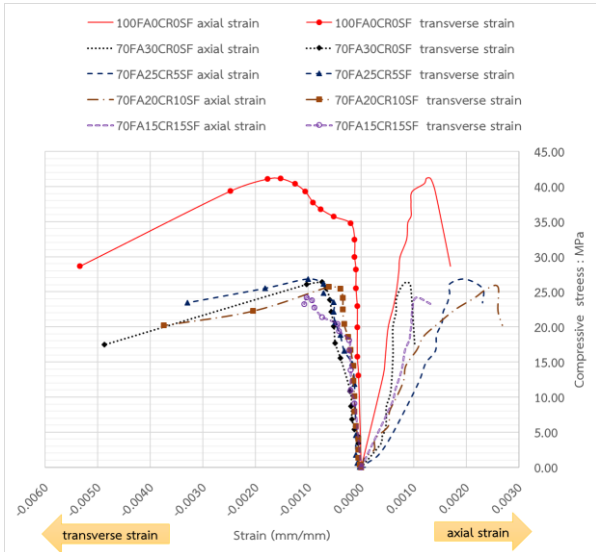
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากถั่วลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล่างและซิลิกาฟุ่ม (ร้อยละ 10) ที่อายุบ่มเท่ากับ 7 วัน



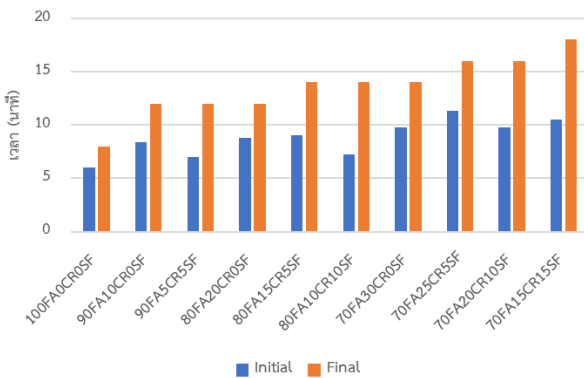
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากถั่วลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล่างและซิลิกาฟุ่ม (ร้อยละ 20) ที่อายุบ่มเท่ากับ 7 วัน

ส่วนผลการทดสอบอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากถั่วลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล่างและซิลิกาฟุ่ม พบว่า กราฟมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าการใช้กากดินล่างและซิลิกาฟุ่มทำให้อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของกากดินล่างทำให้เนื้อคอนกรีตมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้น จึงอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปร่างของคอนกรีต ซึ่งโดยปกติคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.20-0.25 [11] และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถั่วลอยแคลเซียมสูงมีค่าอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.21-0.31 [12] ส่วนคอนกรีตปกติจะมีอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.11-0.21 [11] จากผล

การทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ส่วนผสมที่มีค่ามากกว่า 0.31 อาจหมายถึงคอนกรีตที่มีพฤติกรรมการเสียรูปร่างแบบบวมตัวหรือขยายตัวด้านข้างมากซึ่งสอดคล้องกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่กราฟจะมีลักษณะคว่ำเป็นอย่างมาก



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้าและซิลิกาฟุ่ม (ร้อยละ 30) ที่อายุบ่มเท่ากับ 7 วัน



รูปที่ 7 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวเริ่มปลายของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

3.3 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้าและซิลิกาฟุ่มดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตอยู่ในช่วง 6-11 นาที และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มปลายของคอนกรีตอยู่ในช่วง 8-18 นาที เมื่อพิจารณาปัจจัยของการใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต พบว่า การใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับการผลิตคอนกรีตช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ อาจเนื่องจากการใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มช่วยเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่อ

อะลูมินาในระบบของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว ซึ่งโดยปกติแล้วอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลเพิ่มขึ้น [9]

4. บทสรุป

4.1 การใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงส่วนผสม อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาภายในระบบ

4.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วผสมกากดินล้าร้อยละ 10 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสามารถให้ค่ากำลังอัดสูงถึง 42.0 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.2 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน

4.3 การใช้กากดินล้าและซิลิกาฟุ่มแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีแนวโน้มลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกากดินล้าส่งผลให้คอนกรีตมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้นจึงอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปร่างแบบบวมตัวหรือขยายตัวด้านข้างมาก

4.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีค่าระหว่าง 7.6-34.4 จิกะปาสคาล ส่วนอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีค่าระหว่าง 0.18-0.33

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8): pp. 1633-1656.
- [2] Chindapasirt, P. and Rattanasak, U. (2010). Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer, *Waste Management*, 30: pp. 667-672.
- [3] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Chindapasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*, 53, pp. 269-274.
- [4] Abrams, D. A., *Design of Concrete Mixtures*, Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 1918

- [5] Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, P., Cement, Pozzolan and Concrete, 6th edition
- [6] ASTM C618-17a (2017). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, annual book of ASTM standards, vol. 04.02.
- [7] ASTM C39 M-18 (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standard, Vol.04.02.
- [8] ASTM C469 (2002). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. Annual Book of ASTM Standard, Vol.02.01.
- [9] Chindaprasirt P., De Silva P., Sagoe-Crenstil K. and Hanjitsuwan S. (2012). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, 47: pp. 4876-4883.
- [10] Kroehong W., Sinsiri T., Jaturapitakkul C., and Chindaprasirt P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, *Construction Building and Materials*, 25(11): pp. 4095-4104.
- [11] Sofi M., van Deventer J.S.J., Mendis P.A., and Lukey G.C. (2007). Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs), *Cement and Concrete Research*, 37: pp. 251-257.
- [12] Phoo-ngernkham T., Phiangphimai Ch., Damrongwiriyanupap N., Hanjitsuwan S., Thumrongvut J. and Chindaprasirt P. (2018). A Mix Design Procedure for Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash Concrete Cured at Ambient Temperature. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018: pp. 1-13.