สมบัติเชิงกลของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม

Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Incorporating Clay Residue and Silica Fume

แสงสุรีย์ พังแดง[1] สมพร งามทวี[2] ธวัชชัย โทอินทร์[3*] สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ์[4] และธนากร ภูเงินชำ[2]

Saengsuree Pangdaeng[1] Somporn Ngamtavee[2] Tawatchai Tho-in[3*] Sakonwan Hanjitsuwan[4] and Tanakorn Phoo-ngernkham[2]

Received: *August 18, 2021;* ***Revised:*** *November 28, 2021;* ***Accepted:*** *November 28, 2021*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม โดยใช้สัดส่วนของเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อกากดินล้างต่อซิลิกาฟูมเท่ากับ 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 เป็นสารละลายด่างในส่วนผสม โดยทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม ผลการทดสอบพบว่า การใช้กากดินล้างแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับการผลิตเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูม สามารถใช้กากดินล้างผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ถึงร้อยละ 10 ผสม โดยไม่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

คำสำคัญ : เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต; กากดินล้าง; ซิลิกาฟูม; สมบัติเชิงกล

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม*

[2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน*

[3] *คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น*

[4] *คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*

[1] *Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University*

[2] *Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan*

[3] *Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus*

[4] *Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 09 0979 5296, E - mail: tawatchai.to@rmuti.ac.th*

Abstract

The purpose of this paper was to investigate the mechanical properties of fly ash (FA) geopolymer concrete incorporating 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. Alkaline solutions of sodium silicate and 10 molar sodium hydroxide were employed as activators. The setting time, compressive strength, elasticity modulus, and Poisson's ratio of FA geopolymer concrete were studied. According to the test results, replacing CR for FA in the production of FA geopolymer concrete could result in a delay in its setting time. Compressive strength and elastic modulus of FA geopolymer concrete decreased with an increase in both CR and SF. It can be concluded that FA geopolymer concrete with 10 % CR did not negatively affect the compressive strength.

Keywords: Fly Ash Geopolymer Concrete; Clay Residue; Silica Fume; Mechanical Properties

บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศปริมาณมาก และปัญหาการกำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม ทำให้เกิดแรงกระตุ้นในการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าวที่เพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นวัสดุใหม่มากขึ้น โดยใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์หรือลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง หนึ่งในนั้นคือวัสดุอัลคาไล [1] – [2]

วัสดุอัลคาไลสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่เป็นด่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทำให้เกิดปฏิกิริยาและเกิดการแข็งตัวและสามารถรับกำลังได้ วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น [1] – [2] ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย ซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมที่มีปริมาณสูงเป็นหลัก จากรายงานวิจัยพบว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [3] อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตคอนกรีตยังคงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น กระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบเสริมที่มีองค์ประกอบของซิลิกาเข้ามาทำปฏิกิริยาร่วมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง เพื่อให้ได้ผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสารประกอบนี้มีสมบัติในการยึดประสานมากขึ้นภายในระบบของวัสดุอัลคาไล

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการใช้ซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกาที่มีปริมาณของซิลิกามากกว่าร้อยละ 90 ผสมในคอนกรีตทำให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้น เนื่องมาจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมากทำให้สามารถลดค่าความพรุนและเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้มากขึ้น [4] นอกจากนั้นวัสดุอีกหนึ่งชนิดที่มีปริมาณของซิลิกาสูง คือ กากดินล้าง ซึ่งจากข้อมูลกระบวนการผลิตเซรามิก วัตถุดิบที่ใช้จะเป็นดินขาวซึ่งมีปริมาณของซิลิกามากกว่าร้อยละ 45 [5] การล้างแร่ดินขาวแต่ละครั้งจะเหลือปริมาณกากดินขาวมากประมาณร้อยละ 50 – 70 โดยน้ำหนักของแร่ดินที่นำมาล้าง ซึ่งเป็นปริมาณที่มากสำหรับปริมาณของกากดินขาวทุกโรงงานในจังหวัดลำปาง จึงน่าจะเป็นแหล่งให้ซิลิกาที่น่าสนใจสำหรับการผลิตคอนกรีต นอกจากนี้การเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ก็จะทำให้สามารถพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้มีศักยภาพสามารถใช้งานได้

ISSN 2672-9369 (Online)

อย่างเต็มประสิทธิภาพ [6] ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูมและเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาคอนกรีตที่มีการก่อตัวเร็วใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินงานวิจัย

1. **วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ**

เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และกากดินล้าง (CR) จากกระบวนการผลิตเซรามิก จังหวัดลำปาง และซิลิกาฟูม (SF) มีองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้าง และซิลิกาฟูม ดังตารางที่ 1 จะเห็นว่าเถ้าลอยประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก ซึ่งปริมาณผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 60.92 และ CaO เท่ากับร้อยละ 25.79 เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จึงจัดอยู่ในเถ้าลอยประเภท Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] กากดินล้างและซิลิกาฟูมประกอบด้วย ซิลิกาเป็นหลัก โดยเถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) และกากดินล้าง (CR) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และ 2.32 ขณะที่เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) และกากดินล้าง (CR) และซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15.5 ไมครอน 18.3 ไมครอน และ 150 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ (RS) และมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาด 3/8 นิ้ว (CA) โดยมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.56 และ 2.68 และมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.40 และ 6.04

สารละลายด่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีของ Na_2O เท่ากับร้อยละ 12.37 SiO_2 เท่ากับร้อยละ 29.94 และ H_2O เท่ากับร้อยละ 57.69 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้าง และซิลิกาฟูม

Chemical Compositions	FA (%)	CR (%)	SF (%)
SiO_2	31.32	77.48	92.00
Al_2O_3	13.96	9.74	0.70
Fe_2O_3	15.64	2.43	1.20
CaO	25.79	0.54	0.20
MgO	2.94	0.02	0.20
Na_2O	2.83	0.01	0.40
K_2O	2.93	5.61	0.10
SO_3	3.29	1.01	-

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m^3)

Symbol	FA	CR	SF	NH	NS	RS	CA	SP
100FA0CR0SF	427	-	-	118	118	489	1201	4.3
90FA10CR0SF	385	43	-	118	118	490	1202	4.3

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m^3) (ต่อ)

Symbol	FA	CR	SF	NH	NS	RS	CA	SP
90FA5CR5SF	385	21	21	118	118	489	1199	4.3
80FA20CR0SF	342	85	-	118	118	491	1204	4.3
80FA15CR5SF	342	64	21	118	118	489	1201	4.3
80FA10CR10SF	342	43	43	118	118	488	1198	4.3
70FA30CR0SF	299	128	-	118	118	491	1206	4.3
70FA25CR5SF	299	107	21	118	118	490	1203	4.3
70FA20CR10SF	299	85	85	118	118	489	1199	4.3
70FA15CR15SF	299	64	64	118	118	488	1196	4.3

2. อัตราส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่แสดงในตารางที่ 2 โดยใช้สัดส่วนของเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อกากดินล้างต่อซิลิกาฟูมเท่ากับ 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 กากดินล้างและซิลิกาฟูมให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ผสมเป็นเวลา 1 นาที เติมมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบผสมเป็นเวลา 1 นาที และเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารพลาสติกไซเซอร์ผสมอีกครั้งให้เข้ากันประมาณ 1 นาที การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วดังรูปที่ 1

(ก) การบรรจุคอนกรีต

(ข) ลักษณะการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 1 วิธีเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

3. เตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทลงแบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร และกระทุ้งตามมาตรฐาน ASTM C39 [8] แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมงหลังจากการเทตัวอย่างลงแบบ จากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกครั้ง ดังรูปที่ 1(ข) และเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

ISSN 2672-9369 (Online)

รูปที่ 2 การทดสอบกำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ววิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C39 [8] ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C469 [9] ดังรูปที่ 2 สำหรับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหาได้จากสมการที่ (1) และอัตราส่วนปัวซองหาได้จากสมการที่ (2)

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \tag{1}$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.00005} \tag{2}$$

เมื่อ

E	หมายถึง	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (GPa)
S_2	หมายถึง	ความเค้นอัดของคอนกรีตที่ร้อยละ 40 ของกำลังอัดประลัย (MPa)
S_1	หมายถึง	ค่าความเค้นอัดที่เกิดความเครียดเท่ากับ 0.00005 (MPa)
ε_2	หมายถึง	ค่าความเครียดที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ S_2
μ	หมายถึง	ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต
ε_{t2}	หมายถึง	ค่าความเครียดด้านข้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่างคอนกรีตเมื่อมีความเค้นเท่ากับ S_2
ε_{t1}	หมายถึง	ค่าความเครียดด้านข้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่างคอนกรีตเมื่อมีความเค้นเท่ากับ S_1

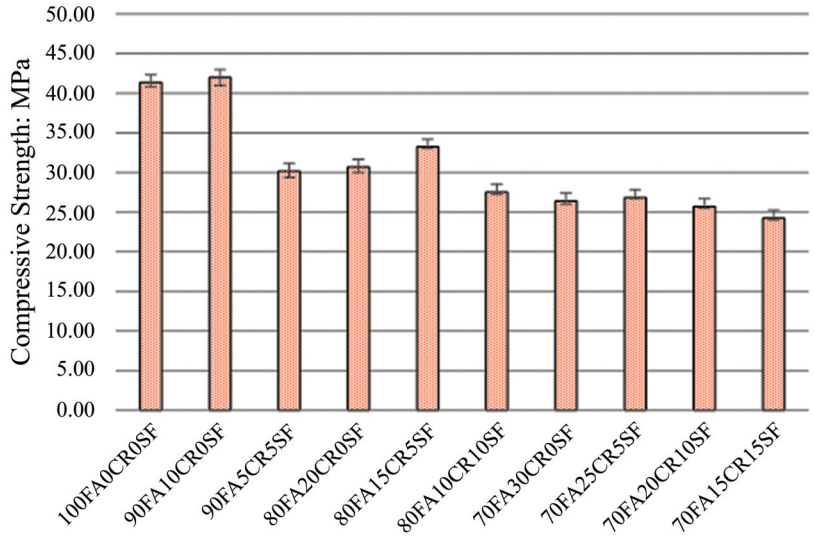
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. **กำลังอัด**

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม ดังรูปที่ 3 พบว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาในระบบของการผลิตคอนกรีตจากการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมในส่วนผสมเกินปริมาณที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต อีกทั้งซิลิกาจากกากดินล้างเป็นซิลิกาที่ไม่มีความว่องไวมากเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซิลิกาจากเถ้าลอย ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่นเพื่อให้ได้ผลผลิตโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) หรือ

จีโอโพลิเมอร์เจลน้อยกว่า [10] แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของซิลิกาจากกากดินล้างและซิลิกาฟูมจะช่วยการทำปฏิกิริยาในช่วงอายุปลายทำนองเดียวกับปฏิกิริยาปอซโซลานของระบบซีเมนต์ปกติ [11] ซึ่งผลการทดสอบตามรูปที่ 3 เป็นการทดสอบของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุเพียง 7 วัน ซึ่งเป็นไปได้ว่ากำลังอัดช่วงต้นของการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมในส่วนผสมของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะช้ากว่าเมื่อพิจารณาการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงในส่วนผสมเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ควรต้องมีการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูมในอายุปลายเพิ่มเติม

นอกจากนี้รูปที่ 3 ยังพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างร้อยละ 10 (ส่วนผสม 90FA10CR0SF) มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดสูงถึง 42.0 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ส่วนผสม 100FA0CR0SF) ที่ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.2 เมกะปาสคาล อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณการแทนที่ด้วยกากดินล้างที่ร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุ 7 วัน

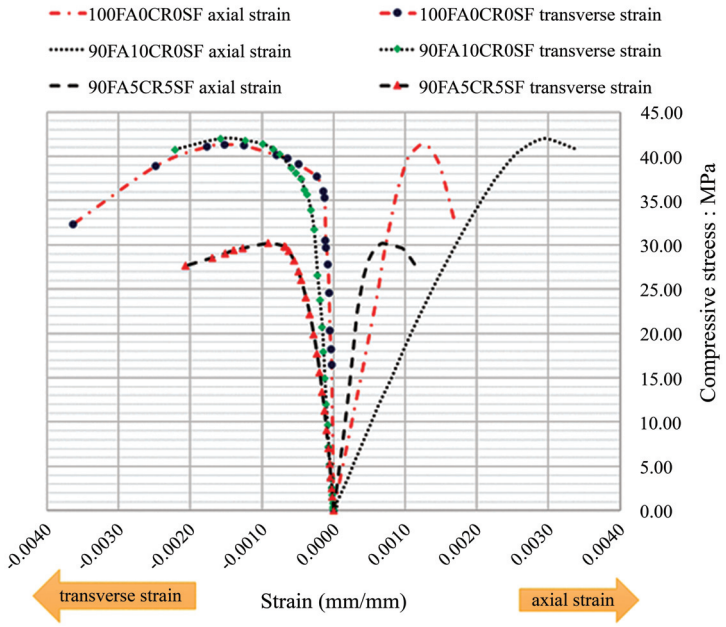
ตารางที่ 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุ 7 วัน

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

ISSN 2672-9369 (Online)

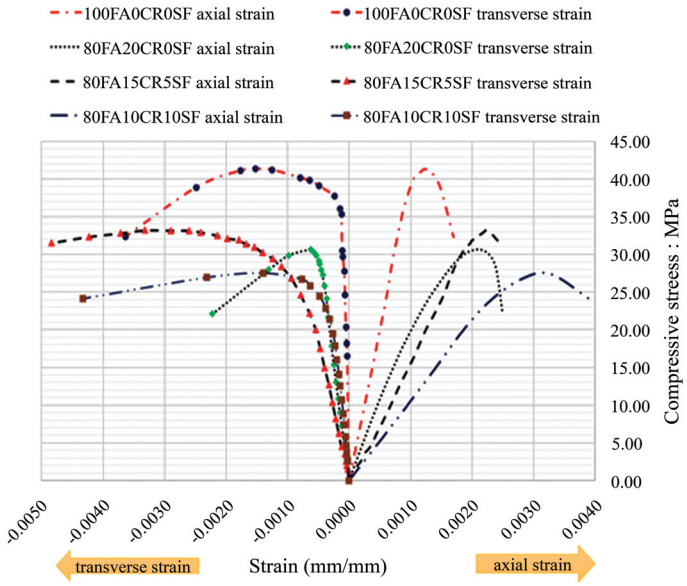
2. **ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง**

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมดังตารางที่ 3 พบว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (รูปที่ 3) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (รูปที่ 4 - 6) ซึ่งการแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมในเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพื่อคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วพบว่า เส้นความชันมีแนวโน้มลดลงซึ่งการที่ความชันลดลงและความเครียดเพิ่มขึ้นแสดงถึงคอนกรีตจะมีความเหนียวมากขึ้นและเป็นข้อดีของโครงสร้างคอนกรีต



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (ร้อยละ 10) ที่อายุ 7 วัน

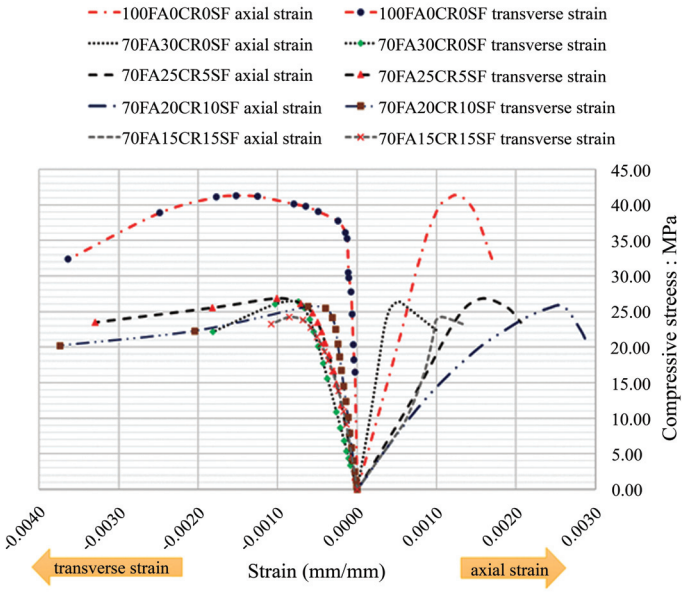
ส่วนผลการทดสอบอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมพบว่า กราฟมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมทำให้อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของกากดินล้างทำให้เนื้อคอนกรีตมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้น จึงอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปร่างของคอนกรีต ซึ่งโดยปกติคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.20 - 0.25 [12] และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.21 - 0.31 [13] ส่วนคอนกรีตปกติจะมีอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.11 - 0.21 [6], [11] จากผลการทดสอบดังตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ส่วนผสมที่มีค่ามากกว่า 0.31 อาจหมายถึงคอนกรีตมีพฤติกรรมการเสียรูปร่างแบบบวมตัวหรือขยายตัวด้านข้างมากซึ่งสอดคล้องกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่กราฟจะมีลักษณะคว่ำเป็นอย่างมาก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (ร้อยละ 20) ที่อายุ 7 วัน

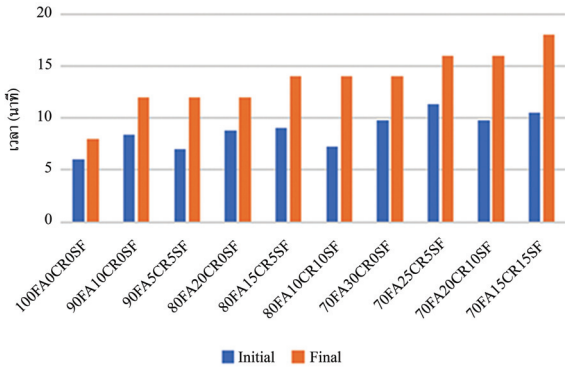
3. ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมดังรูปที่ 7 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตอยู่ในช่วง 6 - 11 นาที และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มปลายของคอนกรีตอยู่ในช่วง 8 - 18 นาที เมื่อพิจารณาปัจจัยของการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตพบว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับการผลิตคอนกรีตช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ อาจเนื่องจากการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมช่วยเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาในระบบของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว ซึ่งโดยปกติแล้วอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลเพิ่มขึ้น [10]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (ร้อยละ 30) ที่อายุ 7 วัน

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 7 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวเริ่มปลายของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

สรุปผล

1. การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงส่วนผสม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารตั้งต้นที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำ

2. กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วผสมกากดินล้างร้อยละ 10 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสามารถให้ค่ากำลังอัดสูงถึง 42.0 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.2 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 7 วัน

3. การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีแนวโน้มลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของกากดินล้างส่งผลให้คอนกรีตมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปร่างแบบบวมตัวหรือขยายตัวด้านข้างมาก

4. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีค่าระหว่าง 7.6 – 34.4 จิกะปาสคาล ส่วนอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีค่าระหว่าง 0.18 – 0.33

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

References

[1] Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. **Journal of Thermal Analysis**. Vol. 37, pp. 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193

[2] Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2010). Utilization of Blended Fluidized Bed Combustion (FBC) Ash and Pulverized Coal Combustion (PCC) Fly Ash in Geopolymer. **Waste Management**. Vol. 30, Issue 4, pp. 667-672. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.040

[3] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive. **Materials and Design**. Vol. 53, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.018

[4] Abrams, D. A. (1918). **Design of Concrete Mixtures**. Lewis Institute, Chicago

[5] Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. (2012). **Cement Pozzolan and Concrete**. Thailand Concrete Association, Bangkok

[6] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI JOURNAL**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30. (in Thai)

[7] ASTM C618-15. (2015). **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[8] ASTM C39. (2001). **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[9] 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.

[10] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems. **Journal of Materials Science**. Vol. 47, No. 12, pp. 4876-4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y

[11] 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 and Building Materials**. Vol. 25, Issue 11, pp. 4095-4104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.062

[12] 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**. Vol. 37, Issue 2, pp. 251-257. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.10.008

[13] Phoo-ngernkham, T., Phiangphimai, C., 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**. Vol. 2018, pp. 1-13. DOI: 10.1155/2018/2460403

ISSN 2672-9369 (Online)