



อิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ Influence of portland cement replacement in high calcium fly ash geopolymer paste

ธนากร ภูเงินคำ^{*1)} ปริญญา จินดาประเสริฐ¹⁾ วันชัย สะตะ¹⁾ และ สกมลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ²⁾

Tanakorn Phoo-ngernkham^{*1)} Prinya Chindaprasit¹⁾ Vanchai Sata¹⁾ and Sakonwan Hanjitsuwan²⁾

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 40002.

²⁾สาขาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จังหวัดลำปาง 52100

Program of Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang, Thailand, 52100.

Received February 2013

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อคุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นสารละลายต่างในการทำปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัว และค่าความเครียดดัดมีแนวโน้มลดลง แต่กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วัน ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงร้อยละ 15 เท่ากับ 36.7 เมกะปาสคาล และ 13,300 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์ เถ้าลอยแคลเซียมสูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น

Abstract

This article presents the influence of ordinary Portland cement (OPC) replacement in high calcium fly ash (FA) geopolymer paste. FA was used to replace OPC at the rate of 5, 10 and 15% by mass of binder. Sodium silicate (Na_2SiO_3) and 10 molar sodium hydroxide (NaOH) solutions were used as the alkaline solution in the reaction. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 2.0 and the liquid/binder (L/B) ratio of 0.60 were used in all mixtures. The results of increase OPC replacement, the setting time and compressive strain capacity decreased while the compressive strength and modulus of elasticity increased. The compressive strength and modulus of elasticity at 28 days of geopolymer pastes with 15% OPC replacement were 36.7 MPa and 13,300 MPa, respectively.

Keywords : Geopolymer, High calcium fly ash, Portland cement, Compressive strength, Modulus of elasticity.

*Corresponding author. Tel.: +66-4320-2355; fax: +66-4320-2355 ext.12

Email address: tpcivil2526@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง จีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (Silica, SiO_2) และอะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยให้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถรับแรงได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ [1] วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ ดินขาว ถ้ำถ่านหิน เป็นต้น [2, 3] ในประเทศไทยนั้นการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์โดยส่วนมากนิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งเถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีประมาณ 3 ล้านตัน [4] เถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมเป็นหลัก โดยปกติเถ้าลอยจะใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ความสามารถทำงานได้ ความทนทาน และกำลังรับแรงอัดในอายุปลายของคอนกรีต [5, 6]

จากรายงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศพบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรดที่ดี [7] ดังนั้นเถ้าลอยจึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ [4, 8] แต่จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีความแข็งแรงต่ำที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ดังนั้นกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มีค่าประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส [2] แต่การนำไปใช้ในงานทางด้านก่อสร้างมีความลำบากและยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่พยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเติมสารผสมเพิ่มในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เช่น ยิปซัม ซิลิกา ฟุ่ม และแคลเซียม เป็นต้น [9, 10] จากงานวิจัยของ Garcia-Lodeiro et al. [11] พบว่าปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลเชิงบวกต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิ

เมอร์จากเถ้าลอย อีกทั้งสามารถก่อให้เกิดผลผลิตไฮเดรชันแทรกอยู่กับจีโอโพลิเมอร์ทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และจากรายงานวิจัยของ Palomo et al. [12] มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมในระบบของจีโอโพลิเมอร์สามารถเพิ่มปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แสดงถึงการอยู่ร่วมกันของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และจีโอโพลิเมอร์เจล (NASH) [13, 14] ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลในอายุปลายของจีโอโพลิเมอร์ [15] นอกจากนั้นปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยกับสารละลายด่างเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจึงต้องใช้ความร้อนในการเร่งความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ [16] การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบของจีโอโพลิเมอร์ไม่เพียงแต่ปรับปรุงคุณสมบัติทางกลเท่านั้น แต่ยังช่วยเร่งการก่อตัวและการเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ควรใช้ในปริมาณไม่มาก เนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงพอต่อการเร่งกระบวนการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณแคลเซียมโดยการใช้น้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับจะช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) สารละลายด่างที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) (13.89% Na_2O , 32.15% SiO_2 และ 46.04% H_2O)

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 1 เถ้าลอยประกอบด้วย

ซิลิการ้อยละ 29.32 อะลูมินาร้อยละ 12.96 เหล็กออกไซด์ร้อยละ 15.64 และแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 25.79 ซึ่งผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก มีค่าเท่ากับ 57.92 จัดเป็นเถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [17] ความละเอียดทดสอบตามวิธีของเบลน (Blaine fineness) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 4300, 3600 ซม²/ก และ 8.5, 14.6 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

2.2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3 เถ้าลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยแทนชื่อของส่วนผสมด้วย Control, FA5PC, FA10PC และ FA15PC ตามลำดับ ในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) เท่ากับ 0.60 และ 2.0 ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนผสม โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Sathonsaowaphak et al. [18] และ Phoo-ngernkham and Sinsiri [19]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical/Materials	FA	OPC
SiO_2	29.32	20.80
Al_2O_3	12.96	4.70
Fe_2O_3	15.64	3.40
CaO	25.79	65.30
MgO	2.94	1.50
K_2O	2.93	0.40
Na_2O	2.83	0.10
SO_3	7.29	2.70
LOI	0.30	0.90

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Physical/Materials	FA	OPC
Specific gravity	2.61	3.16
Mean particle size, d_{50} (μm)	8.5	14.6
Blaine fineness (cm^2/g)	4300	3600

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Mix No.	Symbol	Mix proportion (g)		NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)
		FA	OPC		
1	Control	100	0	20	40
2	FA5PC	95	5	20	40
3	FA10PC	90	10	20	40
4	FA15PC	85	15	20	40

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วยผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันก่อนนำไปใช้เป็นสารละลายต่างในส่วนผสม ส่วนลำดับการผสมจะผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายต่างและผสมเป็นเวลา 5 นาที โดยทั่วไปแล้วการผสมจีโอโพลิเมอร์จะใช้เวลาการผสมประมาณ 10 นาที ซึ่งลำดับการผสมจะประกอบด้วยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตอีกเป็นเวลา 5 นาที [20]

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

2.3.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเครื่องมือไวกซ์ตามมาตรฐาน ASTM C191 [21] โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 2 ครั้ง

2.3.2 การทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดนั้นหลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้วทำการเทลงแบบขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [22] ทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำความชื้นของตัวอย่าง และตั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติก และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [22] ดังแสดงในรูปที่ 1(ก)

ส่วนการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 25 และความสูงเท่ากับ 50 มิลลิเมตร โดยทั่วไปแล้วการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นและความเครียดอัดนิยมใช้สัดส่วนของความสูงต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 [23, 24] การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบดำเนินตามมาตรฐาน ASTM C469 [25] ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง



(ก) การทดสอบกำลังรับแรงอัด



(ข) การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น

กับความเครียดอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

รูปที่ 1 ลักษณะการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

2.3.3 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

การเตรียมตัวอย่างทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอโพลิเมอร์เฟสส์ เลือกชิ้นตัวอย่างที่อยู่ตรงกลางของทรงลูกบาศก์ ใช้สิ่วสกัดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสส์ให้เป็นก้อนเล็กๆ ขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสส์ที่แปรผันตามปริมาณแทนที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30, 27, 20 และ 15 นาที และระยะก่อตัวปลายมีค่าเท่ากับ 58, 47, 38 และ 26 นาที ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสส์พบว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสส์มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วกว่าซีเมนต์เฟสส์ ซึ่งจากงานวิจัยของ Napia et al. [26] รายงานว่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายของซีเมนต์เฟสส์มีค่าเท่ากับ 132 และ 181 นาที ตามลำดับ จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสส์มีการทำปฏิกิริยาที่เร็วขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถทำงานได้ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้จีโอโพลิเมอร์เฟสส์สามารถจับตัวกันและแข็งตัวได้รวดเร็วขึ้น [27, 28] นอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาและเกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) [11] ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์แสดงถึงการลดลงของปริมาณซิลิกาและอะลูมินาส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยามากขึ้น การก่อตัวที่รวดเร็วของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมหรืองานอื่นๆ ที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Symbol	Setting time (min)	
	Initial	Final
Control	30	58
FA5PC	27	47
FA10PC	20	38
FA15PC	15	26

3.2 กำลังรับแรงอัด

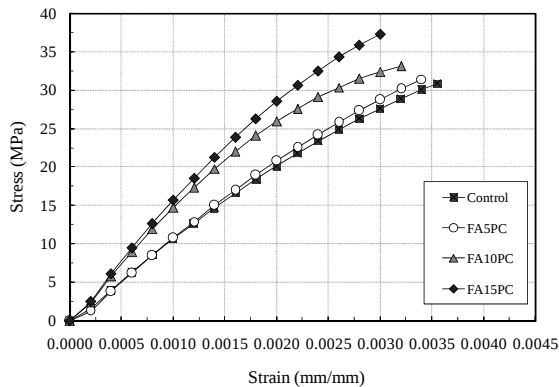
ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แปรผันตามปริมาณแทนที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อาจเนื่องจากปริมาณของแคลเซียมที่สูงขึ้นช่วยให้มีการทำปฏิกิริยามากขึ้นในระบบของจีโอโพลิเมอร์ [29] ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัด [30] อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ให้มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เหมือนมวลรวมเล็กๆ ส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงและกำลังรับแรงอัด [30, 31] นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากการทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาส่งผลให้มีการปรับแต่งขนาดโพรงในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ [32] จึงส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัด [10] นอกจากนี้ยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่องเป็นแนวโน้มที่ดีในการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุปลาย

ตารางที่ 5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Mix	Symbol	Compressive strength (MPa)		
		7 days	28 days	90 days
1	Control	16.8	29.6	39.4
2	FA5PC	19.6	31.7	46.3
3	FA10PC	20.5	33.9	50.4
4	FA15PC	20.9	36.7	52.2

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 2 พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากมีความหนาแน่นและแข็งแรงกว่า ซึ่งโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 และ 15 มีค่าใกล้เคียงกับโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีค่าระหว่าง 12,500-17,500 เมกะปาสคาล [33, 34] ในเบื้องต้นสามารถพิจารณาได้ว่าปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตภายในระบบจีโอโพลิเมอร์ และทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์เพสต์จึงมีความแน่นมากขึ้น [30, 31] ส่วนความเครียดอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์พบว่าค่าความเครียดอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งซีเมนต์เพสต์จะมีค่าความเครียดอัดที่กำลังอัดสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.003-0.004 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร [35]



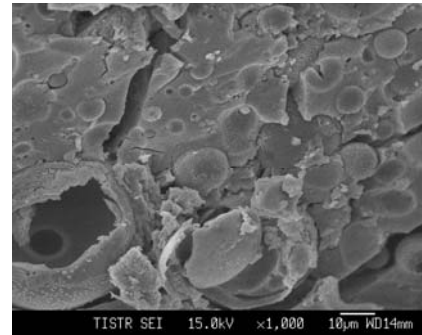
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 6 ความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

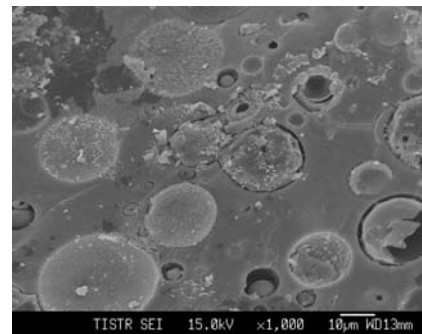
Mixes	ϵ_p (mm/mm)	E (MPa)
Control	0.00355	9,200
FA5PC	0.00348	9,400
FA10PC	0.00317	12,700
FA15PC	0.00297	13,300

3.4 โครงสร้างทางจุลภาค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของ แก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วยแก้วลอยที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาฝังอยู่ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ แต่เมื่อมีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณแก้วลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยามีน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์ล้วน ซึ่งทำให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มีความหนาแน่นกว่า อาจเนื่องจากการใช้แก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์จะมีปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอยู่ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล [13, 14] ในทำนองเดียวกันกับการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์



(n) Control



(ข) FA10PC

รูปที่ 3 SEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า

(1) การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ในแก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ให้สั้นลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมในระบบจีโอโพลิเมอร์ โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวปลายเท่ากับ 15-30 นาที และ 26-58 นาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไปประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมหรืองานอื่นๆ ที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว

(2) กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 36.7 เมกะปาสคาล

(3) โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์เฟสเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเครียดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ทำให้โครงสร้างมีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 13,300 เมกะปาสกาล

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้คณบดีคณบดีที่พิเศษชั้นสูงมหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สกอ.ภาคใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก ร่วมกับมหาวิทยาลัยขอนแก่น (PHD/0340/2552)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits J. Geopolymers-Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*. 1991; 37(8): 1633-56.
- [2] Bakharev T. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36(6): 1134-47.
- [3] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*. 2004; 101(6): 467-72.
- [4] Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 2007; 29(3): 224-29.
- [5] Rukzon S, Chindaprasirt, P. Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar. *Computers and Concrete*. 2008; 5(1): 75-88.
- [6] Yeh IC. Modelling slump of concrete with fly ash and superplasticizer. *Computers and Concrete*. 2008; 5(6): 559-72.
- [7] Bakharev T. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*. 2005; 35(6): 1233-46.
- [8] Rattanasak U, Pankhet K, Chindaprasirt P. Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2011; 18(3): 364-69.
- [9] Allahverdi A, Kani EN, Yazdanipour M. Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics – Silikaty*. 2011; 55(1): 68-78.
- [10] Guo X, Shi H, Chen L, Dick WA. Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 173(1-3): 480-86.
- [11] Garcia-Lodeiro I, Palomo A, Fernandez-Jimenez A, MacPhee DE. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, 2011; 41(9): 923-31.
- [12] Palomo A, Fernández-Jiménez A, Kovalchuk G, Ordoñez LM, Naranjo MC. OPC-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration. *Journal of Materials Science*. 2007; 42(9): 2958-66.

- [13] Guo X, Shi H, Dick, WA. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 2010; 32(2): 142-47.
- [14] Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, Chindaprasirt P. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*. 2011; 90(6): 2118-24.
- [15] Temuujin J, van Riessen A. Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 164(2-3): 634-39.
- [16] Pnias D, Giannopoulou IP, Perraki T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2007; 301(1-3): 246-54.
- [17] ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in cement. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04, No. 01; 2008.
- [18] Sathonsaowaphak A. Chindaprasirt P, Pimraksa K. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 168(1): 44-50.
- [19] Phoo-ngernkham T, Sinsiri T. Workability and compressive strength of geopolymer mortar from fly ash containing diatomite. *KKU Engineering Journal*. 2011; 38(1): 11-26.
- [20] Rattanasak U, Chindaprasirt P. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*. 2009; 22(12): 1073-8.
- [21] ASTM C191. Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04, No. 01; 2008.
- [22] ASTM C109. Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04, No. 01; 2002.
- [23] Khandelwal M, Ranjith PG, Pan Z, Sanjayan JG. Effect of strain rate on strength properties of low-calcium fly-ash-based geopolymer mortar under dry condition. *Arabian Journal Geosciences*. 2012: 1-7.
- [24] Pan Z, Sanjayan JG, Rangan BV. An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science*. 2009; 44(7): 1873-80.
- [25] ASTM C469. Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 02, No. 01; 2002.
- [26] Napia C, Sinsiri T, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder. *Waste Management*. 2012; 32(7): 1459-67.
- [27] Van Deventer JSJ, Provis JL, Duxson P, Lukey GC. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 139(3): 506-13.
- [28] Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ. Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1999; 38(10): 3932-41.

- [29] Dombrowski K, Buchwald A, Weil M. The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*. 2007; 42(9): 3033-43.
- [30] Yip CK, Van Deventer JSJ. Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of Materials Science*. 2003; 38(18): 3851-60.
- [31] Yip CK, Lukey GC, Van Deventer JSJ. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*. 2005; 35(9): 1688-97.
- [32] Kroehong W, Sinsiri T, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(11): 4095-04.
- [33] Cook DJ, Chindaprasirt P. A mathematical model for the prediction of damage in concrete. *Cement and Concrete Research*. 1981; 11(4): 581-90.
- [34] Feldman RF, Huang CY. Properties of Portland cement-silica fume pastes part 2 : Mechanical properties. *Cement and Concrete Research*. 1985; 15(6): 943-52.
- [35] Chindaprasirt P. Influence of load history on the properties of concrete [Ph.D. Thesis]. The University of New South Wales; 1980.