อิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ธนากร ภูเงินขำ[1*]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์[2]
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ตำบลชมพู อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100
และ ปริญญา จินดาประเสริฐ[3]
มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 และแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00, 1.25 และ 1.50 สารละลายด่างที่ใช้เป็นของเหลว ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 6 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น ซึ่งอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงสุด ขณะที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้กำลังรับแรงดัดได้สูงสุด

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์ / อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน / ระยะเวลาการก่อตัว / กำลังรับแรงอัด / กำลังรับแรงดัด

* *Corresponding Author : tanakorn.ph@rmuti.ac.th*

1 *อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์*

2 *อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*

3 *ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Influence of Sand to Binder Ratio on Properties of Geopolymer Mortar Containing Portland Cement

Tanakorn Phoo-ngernkham[1*]

Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

Sakonwan Hanjitsuwan[2]

Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

and Prinya Chindaprasirt[3]

Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

Abstract

This article reports the influence of sand to binder ratio (S/B) on selected properties of geopolymer mortar containing Portland cement. Fly ash (FA) was replaced by Portland cement (PC) at the dosages of 0%, 5%, 10%, and 15% at various sand to binder ratios of 1.00, 1.25 and 1.50. The solutions which were used as a liquid alkali solutions were sodium silicate (Na_2SiO_3) and 6-molar sodium hydroxide (NaOH) solutions. The Na_2SiO_3/NaOH ratio of 2.0, liquid/binder ratio of 0.60 and ambient curing temperature were used in all cases. The results showed that the setting time of geopolymer mortar tended to decrease with an increase in the PC replacement. While the S/B ratio increased, the setting time of geopolymer mortar tended to increase. The compressive and flexural strengths of geopolymer mortar obviously increase with an increase in the PC replacement. S/B ratio of 1.25 resulted in the highest compressive strength of the geopolymer mortar, while the S/B ratio of 1.50 resulted in the highest flexural strength of the geopolymer mortar.

Keywords : Geopolymer / Sand to Binder Ratio / Setting Time / Compressive Strength / Flexural Strength

* *Corresponding Author : tanakorn.ph@rmuti.ac.th*

1 *Lecturer, Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.*

2 *Lecturer, Program in Civil Technology, Faculty of Industrial Technology.*

3 *Professor, Department of Civil engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง วัสดุจีโอโพลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถนำวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต ซึ่งถือเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดี อีกทั้งยังใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำ การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สำหรับวัสดุตั้งต้นในประเทศไทยที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ คือ เถ้าลอย ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยดังกล่าวมีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมเป็นหลัก และมีส่วนของอสัณฐานในองค์ประกอบทางแร่ ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาในสภาวะสารละลายด่างได้ดี จึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ [1]

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีความสามารถในการรับกำลังได้ต่ำที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) จำเป็นต้องใช้ความร้อนประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา [2] ทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในงานทางด้านก่อสร้างจริง การเติมสารผสมเพิ่มจำพวกแคลเซียมในเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เช่น ยิปซัม และแคลเซียม เป็นต้น จึงได้รับการศึกษาและพัฒนา [3, 4] เพื่อให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้อง จากงานวิจัยของ Garcia-Lodeiro et al. [5] แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกลของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดผลผลิตไฮเดรชั่นแทรกอยู่กับจีโอโพลิเมอร์ทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และจากรายงานวิจัยของ Palomo et al. [6] มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมในระบบของจีโอโพลิเมอร์สามารถเพิ่มปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแสดงถึงการอยู่ร่วมกันของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและจีโอโพลิเมอร์เจล (NASH) ในโครงสร้าง [7, 8] การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบของจีโอโพลิเมอร์ไม่เพียงแต่ปรับปรุงสมบัติทางกลเท่านั้น แต่สามารถเร่งการก่อตัวและการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ควรใช้ในปริมาณไม่มาก เนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพียงพอต่อการเร่งกระบวนการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น [9]

ทรายเป็นมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งมวลรวมสามารถช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติของวัสดุโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในวัสดุ [10] ตามมาตรฐาน ASTM C109 [11] แนะนำให้ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.75 แต่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม ซึ่งจำเป็นต้องมีสมบัติทางด้านเนื้อแน่นสม่ำเสมอ คุณภาพดี และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [12] พบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้รับช่วยทำให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีต่อสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เป็นวัสดุซ่อมแซม

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการดำเนินวิจัยประกอบด้วย เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) และทรายละเอียด (RS) สารละลายด่าง ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 6 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) (13.89% Na_2O,

32.15% SiO_2 และ 46.04% H_2O)

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 1 เถ้าลอยประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 29.32 อะลูมินาร้อยละ 12.96 เหล็กออกไซด์ร้อยละ 15.64 และแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 25.79 ซึ่งผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก มีค่าเท่ากับ 57.92 จัดเป็นเถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [13] ความละเอียดทดสอบตามวิธีของเบลน (Blaine fineness) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 4300, 3600 ซม^2/ก และ 8.5, 14.6 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

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

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

Materials	Specic gravity	Median particle size, d_{50} (μm)	Blaine neness (cm^2/g)	Fineness modulus
FA	2.61	8.5	4300	-
PC	3.16	14.6	3600	-
Sand	2.63	-	-	1.80

3.2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3 เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 1.00, 1.25 และ 1.50 ในการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ทุกอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

Symbol	FA (g)	PC (g)	RS (g)	NH (g)	NS (g)
1.00SFA0PC	100	-	100	20	40
1.00SFA5PC	95	5	100	20	40
1.00SFA10PC	90	10	100	20	40
1.00SFA15PC	85	15	100	20	40
1.25SFA0PC	100	-	125	20	40
1.25SFA5PC	95	5	125	20	40
1.25SFA10PC	90	10	125	20	40
1.25SFA15PC	85	15	125	20	40
1.50SFA0PC	100	-	150	20	40
1.50SFA5PC	95	5	150	20	40
1.50SFA10PC	90	10	150	20	40
1.50SFA15PC	85	15	150	20	40

สำหรับการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เริ่มต้นด้วยผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทรายให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายแล้วผสมเป็นเวลาประมาณ 5 นาที โดยก่อนนำสารละลายด่างไปใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมต้องทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันก่อนเป็นเวลา 5 นาที

3.3 การทดสอบตัวอย่าง

3.3.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยเครื่องมือไวแคท โดยการทดสอบประยุกต์จากตามมาตรฐาน ASTM C191 [14] โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 2 ครั้ง

3.3.2 การทดสอบกำลังอัด

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จทำการเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ลงแบบขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร วิธีการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบตัวอย่างดำเนินตามมาตรฐาน ASTM C109 [11] จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกอีกครั้งและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

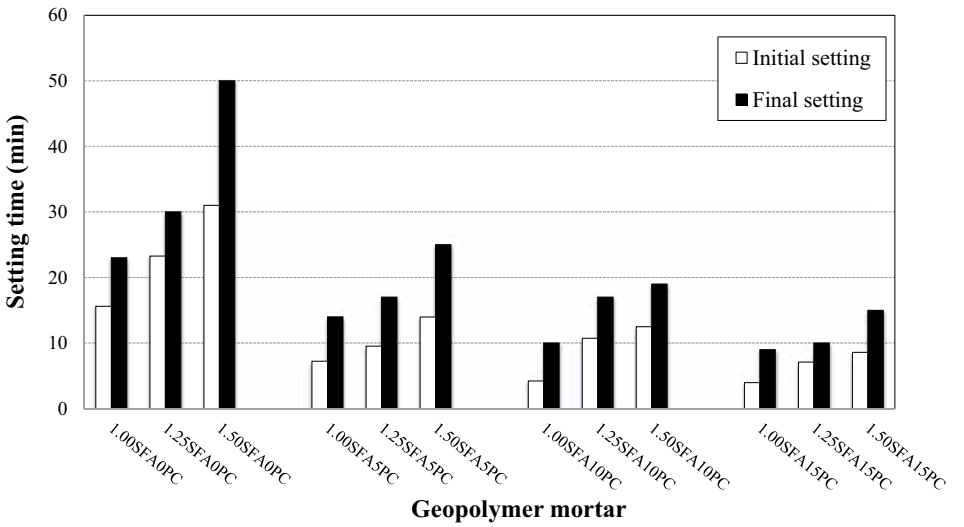
3.3.3 การทดสอบกำลังดัด

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้วการเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ลงแบบขนาด 40x40x160 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C293 [15] ทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างเช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัด หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกอีกครั้งและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการบ่ม 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี ประกอบด้วย กรณีแรกคือปัจจัยของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 1 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ในเถ้าลอยต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ตัวอย่างเช่น ระยะเวลาการก่อตัวของ 1.00SFA0PC, 1.00SFA5PC, 1.00SFA10PC และ 1.00SFA15PC มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 16, 7, 4 และ 4 นาที และระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 23, 14, 10 และ 9 นาที จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หมายถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้น [16] โดยปกติแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เป็นผลผลิตที่ควบคุมการก่อตัวของระบบซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ [17] จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Pangdaeng et al. [18] ได้มีการรายงานไว้ว่าแคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสม ซึ่งการก่อตัวที่รวดเร็วของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการเวลาในการก่อตัวที่รวดเร็ว เช่น งานทางด้านซ่อมแซม เป็นต้น

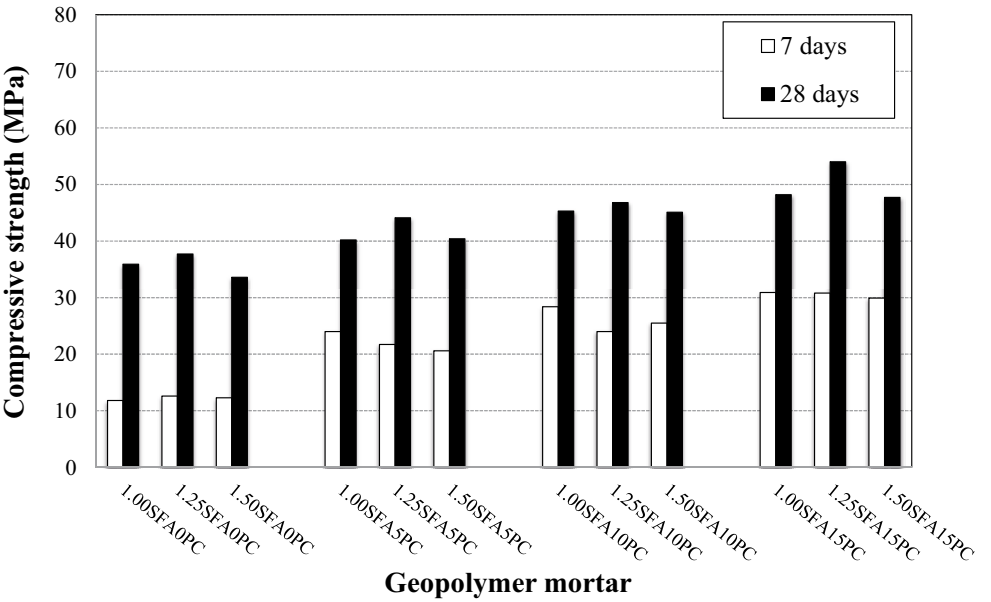
กรณีที่สองคือปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นทุกการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอย ตัวอย่างเช่นระยะเวลาการก่อตัวของ 1.00SFA0PC, 1.25SFA0PC และ 1.50SFA0PC มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 16, 23 และ 31 นาที และระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 23, 30 และ 50 นาที อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายในระบบจีโอโพลิเมอร์ หมายถึง

ปริมาณเนื้อเพสต์ลดลง ปกติทรายเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกาแต่เป็นซิลิกาที่สามารถทำปฏิกิริยาได้น้อยหรือไม่เกิดปฏิกิริยาเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลาน [19] ดังนั้นปริมาณทรายเพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4.2 กำลังอัด

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว กรณีแรกคือปัจจัยของปริมาณการแทนที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอย พบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ของ 1.25SFA0PC, 1.25SFA5PC, 1.25SFA10PC และ 1.25SFA15PC เท่ากับ 37.7, 44.1, 46.8 และ 54.0 เมกะปาสคาล จากงานวิจัยที่ผ่าน [20] รายงานว่าปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลเชิงบวกต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ และ Pangdaeng et al. [18] เสนอว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมไอออนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ช่วยปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากทำให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เหมือนมวลรวมเล็กๆ ส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงและกำลังรับแรงอัด [16, 21, 22]

กรณีที่สองคือปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการทดสอบพบว่าที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทุกอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มให้กำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน ขณะที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 มีแนวโน้มให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด อาจเนื่องจากอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 เป็นปริมาณของทรายภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ที่มีความเหมาะสม ส่งผลให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อพิจาณาจากเปรียบเทียบกับผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 1 ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ จะมีความสามารถชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนจากวัสดุตั้งต้นได้น้อย [23, 24] แต่มีความสามารถชะละลายแคลเซียมไอออนออกมาได้มาก [25] ทำให้สามารถเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว [18] ขณะที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 มีระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และ 1.25 อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่มีปริมาณของทรายเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] หรืออาจเนื่องจากความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในวัสดุเปลี่ยนแปลงตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 มีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยกว่าทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนอื่นๆ



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

4.3 กำลังดัด

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมหมายถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นและเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้มากขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ [9] อีกทั้งผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช่วยพัฒนากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด อีกทั้งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นส่งผลต่อขนาดโพรงในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ [19] ทำให้มีการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ [4] ตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน ของ 1.00SFA0PC, 1.00SFA5PC, 1.00SFA10PC และ 1.00SFA15PC เท่ากับ 3.6, 4.7, 6.0 และ 6.8 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4 กำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

Symbol	28-day flexural strength (MPa)		
	S/B=1.00	S/B=1.25	S/B=1.50
FA0PC	3.6	4.9	5.8
FA5PC	4.7	6.5	7.9
FA10PC	5.6	8.5	9.4
FA15PC	6.8	9.1	9.8

ส่วนปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากวัสดุคละมีผลต่อความเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคในวัสดุภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทำนองเดียวกันกับระบบซีเมนต์มอร์ต้าร์ [10] อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Majeed [26] ที่ได้ศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์พบว่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.50 จากนั้นกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Thakur and Ghost [12] พบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานในช่วงเท่ากับ 0.5-1.5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อพิจาณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานในช่วงเท่ากับ 2.0-3.0 ที่มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

5.1 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นในส่วนผสม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ระบบของจีโอโพลิเมอร์ ขณะที่ปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานแสดงให้เห็นว่าปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยมากขึ้น และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ได้สูงสุด โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยร้อยละ 15 และใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 54.0 เมกะปาสคาล

5.3 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยมากขึ้นทำนองเดียวกันผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นสามารถพัฒนากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยร้อยละ 15 และใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถให้กำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 9.8 เมกะปาสคาล

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

1. Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T. and Chindaprasirt, P., 2013, “Influence of Fineness of High Calcium Fly Ash on Properties of Geopolymer Paste,” *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (4), pp. 399-408 (In Thai).

2. Bakharev, T., 2006, "Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing,” *Cement and Concrete Research*, 36 (6), pp. 1134-1147.

3. Allahverdi, A., Kani, E.N. and Yazdanipour, M., 2011, “Effects of Blast-furnace Slag on Natural Pozzolan-based Geopolymer Cement,” *Ceramics-Silikaty*, 55 (1), pp. 68-78.

4. Guo, X., Shi, H., Chen, L. and Dick, W.A., 2010, “Alkali-activated Complex Binders from Class C Fly Ash and Ca-containing Admixtures,” *Journal of Hazardous Materials*, 173 (1-3), pp. 480-486.

5. Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A. and MacPhee, D.E., 2011, “Compatibility

Studies between N-A-S-H and C-A-S-H Gels. Study in the Ternary Diagram Na_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O," *Cement and Concrete Research*, 41 (9), pp. 923-931.

6. Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Kovalchuk, G., Ordonez, L.M. and Naranjo, M.C., 2007, "OPC-Fly Ash Cementitious Systems : Study of Gel Binders Produced during Alkaline Hydration," *Journal of Materials Science*, 42 (9), pp. 2958-2966.

7. Guo, X., Shi, H. and Dick, W.A., 2010, "Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer," *Cement and Concrete Composites*, 32 (2), pp. 142-147.

8. Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindaprasirt, P., 2011, "NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature," *Fuel*, 90 (6), pp. 2118-2124.

9. Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Sata, V. and Chindaprasirt, P., 2012, "Effects of Portland Cement as Additive in High Calcium Fly Ash Geopolymer on Mechanical and Microstructure Properties," *Proceedings of NCCE17*, p. MAT015 (In Thai).

10. Phoo-ngernkham, T. and Sinsiri, T., 2011, "A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Natural Zeolite," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (1), pp. 31-44 (In Thai).

11. ASTM C109, 2002, "Standard Test Method of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

12. Thakur, R.N. and Ghosh, S., 2009, "Effect of Mix Proportion on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4 (4), pp. 68-74.

13. ASTM C618, 2008, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Cement," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

14. ASTM C191, 2008, "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

15. ASTM C293-02, 2002, "Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-point Loading)," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.02.

16. Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V. and Hanjitsuwan, S., 2014, "Influence of Portland Cement Replacement in High Calcium Fly Ash Geopolymer Paste," *KKU Engineering Journal*, 41 (1), pp. 19-27 (In Thai).

17. Renaudin, G., Russias, J., Leroux, F., Frizon, F. and Cau-dit-Coumes, C., 2009, "Structural Characterization of C-S-H and C-A-S-H Samples-Part I : Long-range Order Investigated by Rietveld Analyses," *Journal of Solid State Chemistry*, 182 (12), pp. 3312-3319.

18. 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*, 53, pp. 269-274.

19. 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*, 25 (11), pp. 4095-4104.

20. Dombrowski, K., Buchwald, A. and Weil, M., 2007, "The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers," *Journal of Materials Science*, 42 (9), pp. 3033-3043.

21. Yip, C.K., Lukey, G.C. and Van Deventer, J.S.J., 2005, "The Coexistence of Geopolymeric Gel and Calcium Silicate Hydrate at the Early Stage of Alkaline Activation," *Cement and Concrete Research*, 35 (9), pp. 1688-1697.

22. Yip, C.K. and Van Deventer, J.S.J., 2003, "Microanalysis of Calcium Silicate Hydrate Gel Formed within a Geopolymeric Binder," *Journal of Materials Science*, 38 (18), pp. 3851-3860.

23. Rattanasak, U., Chalee, W. and Chindaprasirt, P., 2006, "Study of Leaching of Lignite Fly Ash and Strength of Fly Ash Based-geopolymer," *KMUTT Research and Development Journal*, 29 (4), pp. 437-446 (In Thai).

24. Rattanasak, U., Pankhet, K. and Chindaprasirt, P., 2011, "Effect of Chemical Admixtures on Properties of High-calcium Fly Ash Geopolymer," *International Journal of Minerals*, Metallurgy and Materials, 18 (3), pp. 364-369.

25. Phair, J.W. and Van De Venter, J.S.J., 2001, "Effect of Silicate Activator pH on the Leaching and Material Characteristics of Waste-based Inorganic Polymer," *Minerals Engineering*, 14 (3), pp. 289-304.

26. 26. Majeed, S.A., 2009, "Predicting the Relationship between the Modulus of Rupture and Compressive Strength of Cement Mortar," *Al-Rafidain Engineering*, 17 (5), pp. 59-68.