

การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ

ธนากร ภูเงินขำ¹ และ ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ โดยการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก การศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เวลาในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทำการแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ ทดสอบการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน

ผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5-2.0 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่สูง ซึ่งมีค่ากำลังอัดระหว่าง 240-940 กก./ซม.² และค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่จะพัฒนาเร็วในช่วงแรกของการบ่ม แต่ช่วงปลายจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนักหรือไม่มีเลย อีกทั้งผลการทดสอบยังพบอีกว่าการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60 มีความเหมาะสมทั้งการให้ค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ / การไหลแผ่ / ระยะเวลาการก่อตัว / กำลังอัด / ซีโอไลต์ธรรมชาติ

* Corresponding author. E-mail: tpcivil2526@gmail.com

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Natural Zeolite

Tanakorn Phoo-ngernkham ^{1*} and Theerawat Sinsiri ²

Suranaree University of Technology, Maung, Nakhonratchasima, Thailand 30000

Abstract

This article presented properties of geopolymer mortar using fly ash and natural zeolite as a binder. The fly ash was replaced by natural zeolite at the rate 0, 60, 80, and 100% by weight. Sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions were mixed together and then used as a liquid portion in the mixture in order to activate the geopolymerization. The ratios between Na_2SiO_3 and NaOH were varied, namely, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 by weight whereas the liquid/binder ratios of 0.40, 0.50, 0.60, and 0.70 by weight were used. In addition, the NaOH concentrations of 5M, 10M, 15M, and 20M were also used as variables. Each mixture was separated and cured in the oven at the temperature of 75°C for 24 h. Flowability and setting times of all fresh geopolymer mortars were investigated. Additionally, the compressive strength was tested at the ages of 7, 14, 28, and 60 days.

The results revealed that the mixture having $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 1.5-2.0, 15M of NaOH concentration and 75°C of curing temperature, showed a compressive strength ranged between 240-940 ksc which high enough for using as normal and high strength concretes. Additionally, the compressive strength of geopolymer mortar obviously increased at early age. However, at the later age, it slightly increased or did not increase at all for some mixtures. Furthermore, the replacement of natural zeolite at the rate of 60% by weight were well-suited for both compressive strength and workability.

Keywords : Geopolymer / Flow test / Setting times / Compressive strength / Natural zeolite

* Corresponding author. E-mail: tpcivil2526@gmail.com

¹ Graduate Student, School of Civil Engineering, Institute of Engineering.

² Assistant Professor, School of Civil Engineering, Institute of Engineering.

1. บทนำ

จีโอพอลิเมอร์ [1] เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความนิยมในการพัฒนาขึ้นมาเพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ [2] อาจเนื่องจากในสภาวะปัจจุบันวัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต อีกทั้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่ต้องการให้มีลักษณะพิเศษ อาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น โดยการใช้วัสดุที่เหลือใช้หรือวัสดุตามธรรมชาติมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จีโอพอลิเมอร์ (geopolymer) เป็นการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (silica, SiO_2) และอะลูมินา (alumina, Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ [3] จีโอพอลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินาให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ กระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงแล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้สารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สำหรับวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้เป็นวัสดุตั้งต้นได้แก่ เถ้าลอย [4-5] แต่ขณะเดียวกันนอกเหนือจากเถ้าลอยยังมีวัสดุปอซโซลานอีกหลายชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลท์ เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักเช่นเดียวกัน

ซีโอไลต์ซึ่งจัดเป็นสารประกอบออลูมิโนซิลิเกตหรือสารออลูมิโนฟอสเฟตต่อกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ แบบรูปทรง 4 หน้า ซีโอไลต์อาจจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมีนอกจากนี้ยังมีความพรุนสูง (micro porous molecules) มีโพรงภายในโครงสร้างที่มีรูปร่างแน่นอน ขนาดประมาณ 3-30 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} ม.) ภายในโพรงจะเต็มไปด้วยไอออนบวกและโมเลกุลของน้ำ ซึ่งโมเลกุลทั้งสองชนิดสามารถเคลื่อนย้ายได้ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน

บวกได้ดี [6-7]

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในงานจีโอพอลิเมอร์มีระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็วส่งผลให้ความสามารถทำงานได้น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นศึกษาถึงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์ อีกทั้งกำลังอัดพอเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ โดยจากลักษณะของซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีน้ำหนักเบา ความพรุนสูงมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้าจึงน่าที่จะปรับปรุงคุณสมบัติตรงประเด็นนี้ได้ดี อีกทั้งสามารถช่วยลดหน่วงน้ำหนักลงได้

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสามารถทำงานได้ ระยะเวลาการก่อตัวและการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุตั้งต้น โดยวิเคราะห์ในเชิงกายภาพของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยเถ้าลอย Class F (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และซีโอไลต์ธรรมชาติ (NZ) ประเภท Clinoptilolite ($\text{Na,K,Ca}(\text{Si,Al})_{36}\text{O}_{72}2(\text{OH}_2\text{O})$) จากบริษัทเอกชนในจังหวัดกรุงเทพมหานคร

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69

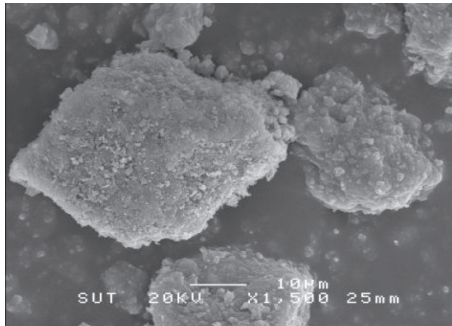
สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งประกอบด้วย Na_2O ร้อยละ 15.32 SiO_2 ร้อยละ 32.87 และ น้ำร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก และมี pH 9.05 ตรวจสอบโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน

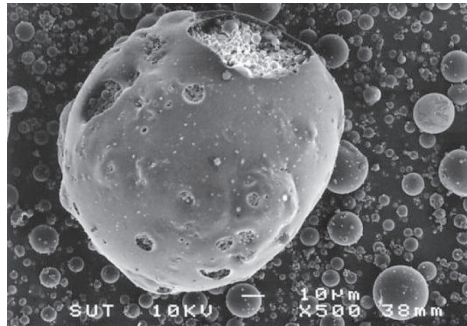
Materials	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	LOI
FA	43.87	26.33	10.81	12.69	2.74	1.23
NZ	75.32	10.28	2.66	3.95	1.20	1.41

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Physical properties	NZ	FA	Sand
Specific gravity	2.28	2.41	2.69
Bulk density (kg/m ³)	440	973	1,625
Median particle size (µm)	16.17	17.60	-



(ก) ซีโอไลต์ธรรมชาติ

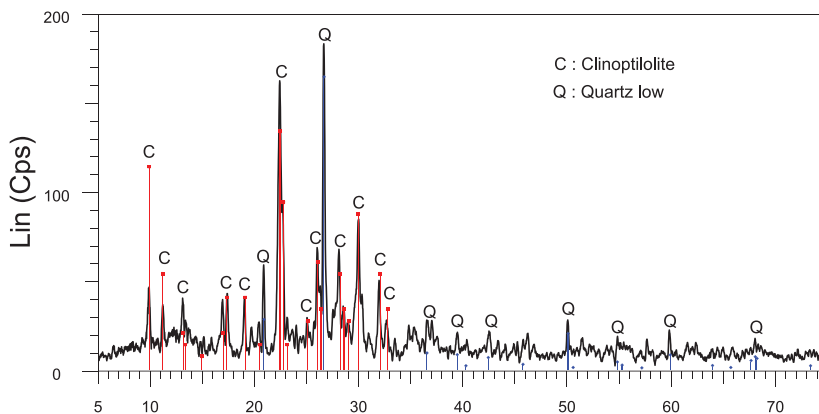


(ข) เถ้าลอย

รูปที่ 1 SEM ของซีโอไลต์ธรรมชาติและเถ้าลอย

จากตารางที่ 2 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่นของซีโอไลต์ธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.28 และ 440 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยและ

ทรายแล้วมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงประมาณร้อยละ 5 และร้อยละ 20 ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นลดลงประมาณร้อยละ 27 และร้อยละ 73 ตามลำดับ



รูปที่ 2 XRD ของซีโอไลต์ธรรมชาติ ประเภท Clinoptilolite

3.2 สัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

สัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ระยะเวลาทิ้งให้ตัวอย่างก่อตัวก่อนการเร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง

เท่ากับ 1 ชั่วโมง และเวลาการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทุกอัตราส่วนผสม โดยทำการแปรผันตามอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดังนี้

1) Series A : แปรผันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

2) Series B : แปรผันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

3) Series C : แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

4) Series D : แปรผันตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง จีโพออลิเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 7, 14, 28 และ 60 วัน

5) Series F : แปรผันตามอัตราส่วนของ Si/Al (S/A) เท่ากับ 1.67, 3.75, 5.12 และ 7.33 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของจีโพออลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามการแทนที่ในแก้วลอย

Mix ID.	Mix Proportion (g)					
	FA	NZ	Sand	Na_2SiO_3	NaOH	S/A*
15M-FA100-1.5	400	-	600	120	80	1.67
15M-FANZ60-1.5	160	240	600	120	80	3.75
15M-FANZ80-1.5	80	320	600	120	80	5.12
15M-FANZ100-1.5	-	400	600	120	80	7.33

หมายเหตุ * คืออัตราส่วน Si/Al ของวัสดุประสาน

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความหมายดังนี้ 15M คือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ FA100 คือ ส่วนผสมความคุมที่ใช้แก้วลอยทั้งหมด FANZ60, FANZ80,

FANZ100 คือการแทนที่ของซีไอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอย ร้อยละ 60, 80, 100 ตามลำดับ และ S/A คืออัตราส่วน ของ Si/Al ของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของจีโพออลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Mix Proportion (g)				
	ratios	Binder	Sand	Na_2SiO_3	NaOH
0.5		400	600	66.7	133.3
1.0		400	600	100.0	100.0
1.5		400	600	120.0	80.0
2.0		400	600	133.3	66.7
2.5		400	600	142.9	57.1

3.3 วิธีผสมและการทดสอบตัวอย่าง

การผสมทำในอุณหภูมิห้องมีค่าระหว่าง 25-45 องศาเซลเซียส เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพอากาศประเทศไทย และการผสมเริ่มต้นด้วยคลุกเคล้าระหว่างวัสดุประสาน

กับทรายให้เข้ากันดี ประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นเติม สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เสร็จ แล้วผสมอีกประมาณ 10 นาที

การทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [8]

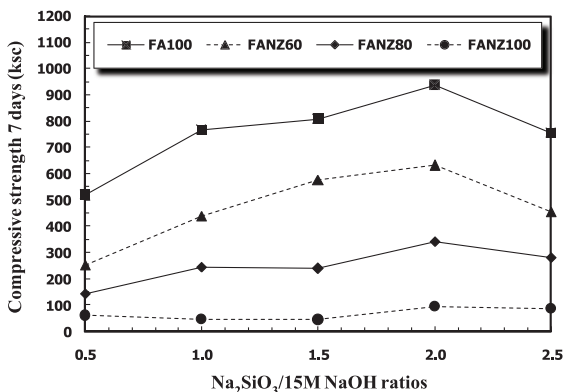
การทดสอบหาค่าระยะการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยทำการดัดแปลงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 [9]

การทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] ที่อายุการบ่ม เท่ากับ 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยใช้แบบอาคริลิคขนาด 50 x 50 x 50 มม. หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

การทดสอบแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$



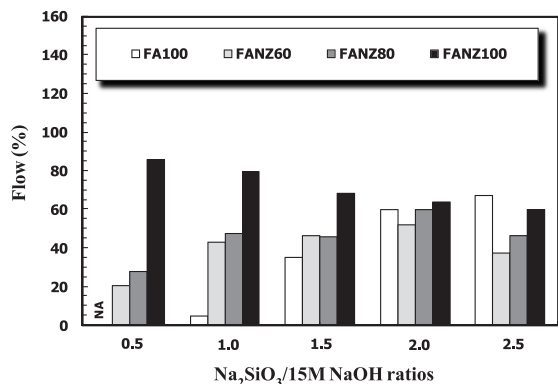
รูปที่ 3 อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัดและการไหลแผ่

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5 การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่ค่ากำลังอัดน้อย ส่วนการแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมดพบว่าการผสมค่อนข้างยากส่งผลให้มีค่าการไหลแผ่ที่น้อย อีกทั้งการหล่อมอร์ตาร์ลงแบบยากส่งผลให้ได้กำลังอัดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ เนื่องจากปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น อีกทั้งค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบอัตราส่วนเท่ากับ 2.0 แต่การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามปริมาณของ Na_2SiO_3

และใช้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโซเดียมซิลิเกตและปริมาณการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติ กล่าวคือแนวโน้มของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย [4,11-18]

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.0-2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60, 80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 240-630 กก./ชม.² และค่าการไหลแผ่ เท่ากับร้อยละ 43-60 แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 630 กก./ชม.² และค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 52



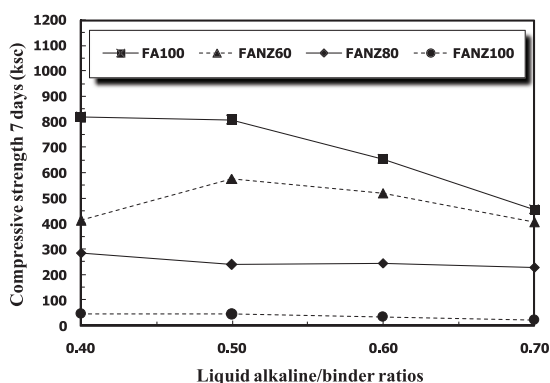
ที่มากขึ้น [19] ส่วนการแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่กำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.0 อย่างไรก็ตาม การแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมดมีการแข็งตัวที่เร็ว เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผสม

จากเหตุผลข้างต้นพอสรุปได้ว่าอิทธิพลของปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่ากำลังอัด เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แก่ส่วนผสม ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ชะเอาซิลิกาและอะลูมินาออกจากสารตั้งต้น เพื่อให้ก่อตัวเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์ ดังนั้น โดยแนวโน้ม

ปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่น้อยทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสมมากขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น

4.2 อิทธิพลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

การทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วน Liquid

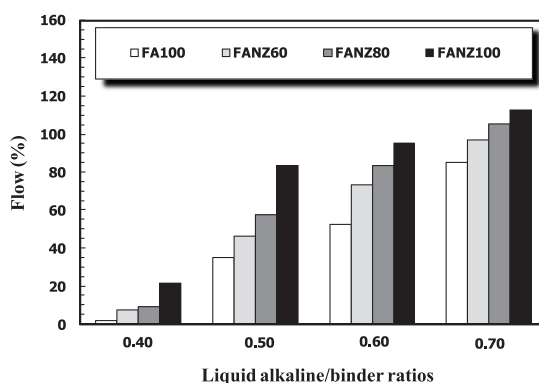


รูปที่ 4 อิทธิพลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อกำลังอัดและการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสม พบว่าที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50-0.60 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60, 80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 240-580 กก./ซม.² และค่าการไหลแผ่ร้อยละ 46-84 แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 580 กก./ซม.² และค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 46

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การแทนที่ด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติทั้งหมดปริมาณของเหลวไม่เพียงพอต่อความต้องการของส่วนผสมส่งผลให้ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดส่วนผสมค่อนข้างแห้งมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่มีค่าน้อยมาก อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง ส่วนที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่สูง

alkaline/binder ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ของซีโอไลด์ธรรมชาติส่งผลต่อค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นแต่ค่ากำลังอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย [4,11-13,15,17]

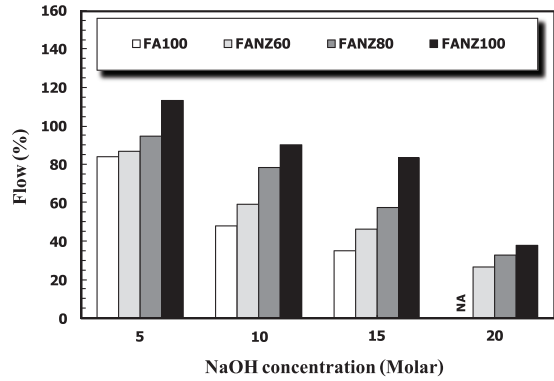
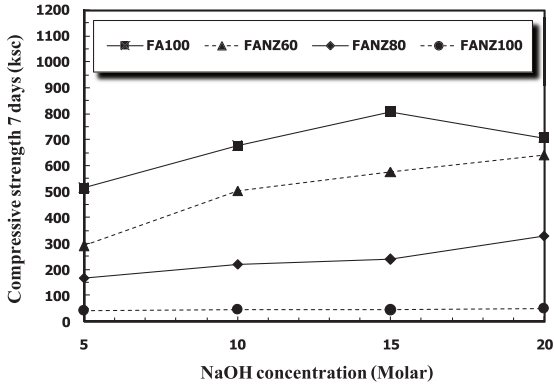


แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ จากงานวิจัย [5,17] ได้มีการให้ข้อสรุปไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของสารละลายในส่วนผสมทำให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนโพรงที่มากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดน้อยลง ในทำนองเดียวกับ W/C ของคอนกรีตทั่วไป

4.3 อิทธิพลของความเข้มข้น NaOH

การทดสอบที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ของซีโอไลด์ธรรมชาติส่งผลต่อค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ สอดคล้องกับงานวิจัย [4,11-15,17-18] กล่าวคือกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น แต่ความสามารถทำงานได้ลดลง



รูปที่ 5 อิทธิพลของความเข้มข้น NaOH ต่อกำลังอัดและการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าความที่เข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60, 80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 220-580 กก./ซม.² และค่าการไหลแผ่ร้อยละ 46-79 แต่ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 580 กก./ซม.² และค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 46

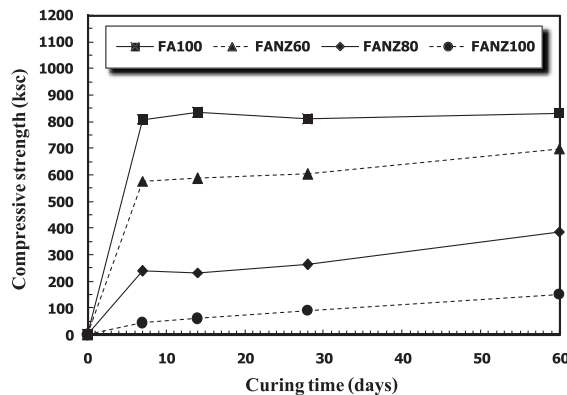
4.4 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

การทดสอบที่แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากหรือไม่มีเลยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [4-5,13-14,17-20]

โดยสมมติฐานเบื้องต้นอาจเนื่องจากการใช้ความเข้มข้น

ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้การทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วแต่อาจมีสารละลายบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด และด้วยลักษณะของสารละลายที่มีความหนืดทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความพรุน อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างไม่ได้แตกต่างจากที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่งผลให้กำลังอัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุพอซโซลานที่ทำให้ขนาดโพรงเล็กลง ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น [22]

สำหรับการแทนที่ด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติ พบว่าซีโอไลด์ธรรมชาติมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้า [7] ช่วงแรกของระยะเวลาการบ่มอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดที่มากนัก โดยสมมติฐานที่ซีโอไลด์ธรรมชาติมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้าจำเป็นต้องการระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นเพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้น [19] ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดสอบถึงระยะเวลาการบ่มที่ 60 วัน ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการทดสอบต่อไป

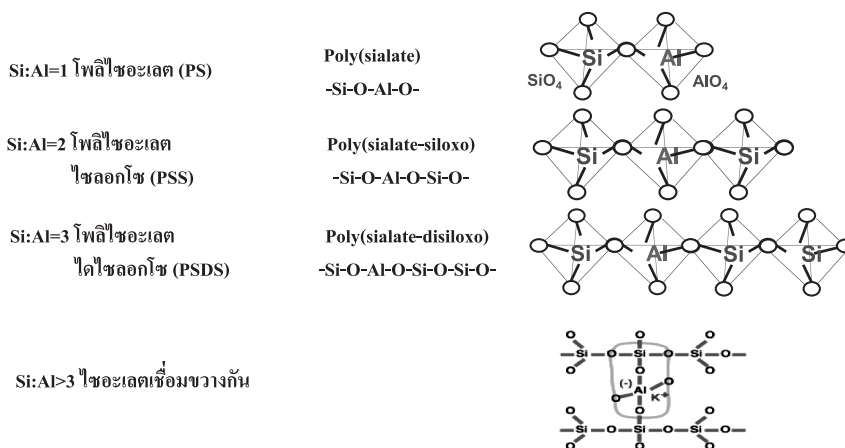


รูปที่ 6 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัด

4.5 อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน พบว่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเลยในช่วงอายุปลาย [23] นอกจากนี้ยังพบว่าทุกส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันมีกำลังอัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมาก สอดคล้องกับงานวิจัย [18, 23]

อีกทั้งจากงานวิจัย [18] ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่าโครงสร้างแบบโพลิไซอะเลตซิลอกโซ (Polysialate-Siloxo; PSS) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าโครงสร้างแบบโพลิไซอะเลตที่เป็นแบบ 2 มิติ และไซอะเลตเชื่อมขวางกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งโครงสร้างแบบโพลิไซอะเลตที่เป็นแบบ 2 มิติ และไซอะเลตเชื่อมขวางกันจะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.67, 3.75, 5.12 และ 7.33 ตามลำดับ



รูปที่ 7 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลิไซอะเลต [3]

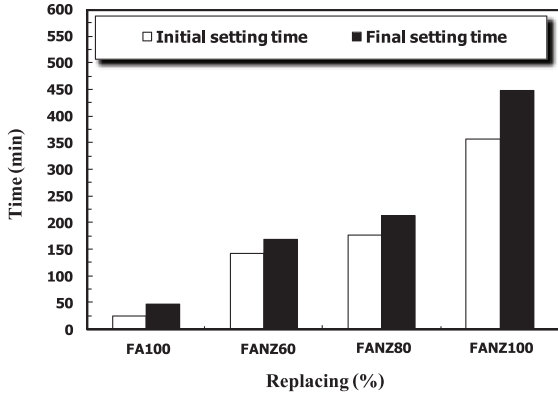
เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผสมและผลทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ในเบื้องต้นพบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ต่ำกว่า ซึ่งแสดงถึงการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมช่วยเพิ่มสามารถทำงานได้ดีขึ้น เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าการแทนที่ด้วยถ้ำลอยทั้งหมด แต่มีกำลังอัดน้อยกว่า ดังนั้นการนำไปใช้งานจำเป็นต้องเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

4.6 ระยะเวลาก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

การทดสอบหาค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อป้องกันความสามารถทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์ นอกจากการทดสอบการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยทดสอบครั้งนี้ได้ทำการดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C191 [9]

ตารางที่ 5 ระยะเวลาก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

สัญลักษณ์	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย
FA100	25	47
FANZ60	142	169
FANZ80	178	213
FANZ100	357	449



รูปที่ 8 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย

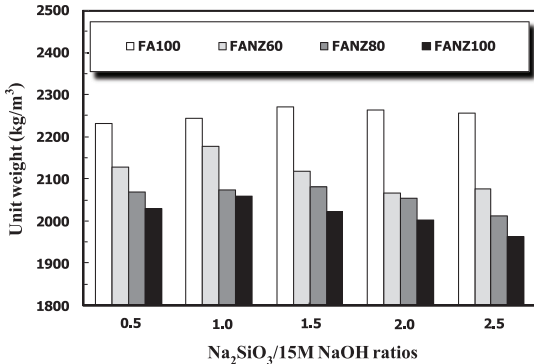
ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 8 ซึ่งมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 25 และ 47 นาที เมื่อแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมพบว่าสามารถยืดระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายมากขึ้น ซึ่งมีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติ

ในเถ้าลอยร้อยละ 60, 80 และ 100 เท่ากับ 142, 178 และ 357 นาที ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60, 80 และ 100 เท่ากับ 169, 213 และ 449 นาที

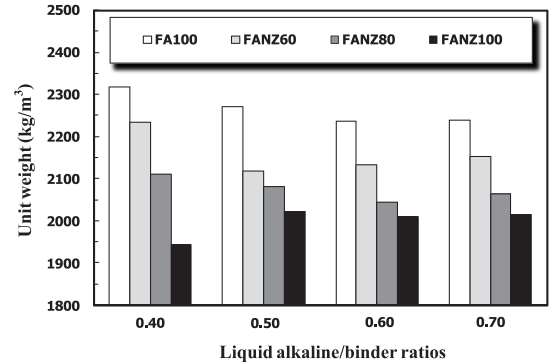
จากงานวิจัยของ [19] ได้ทำการศึกษา Strength and setting time of low calcium fly ash based geopolymer mortar มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 129 และ 270 นาที ซึ่งงานวิจัยนี้มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเร็วกว่ามาก ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการใช้แหล่งที่มาของวัสดุที่แตกต่างกัน [24]

4.7 หน่วยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

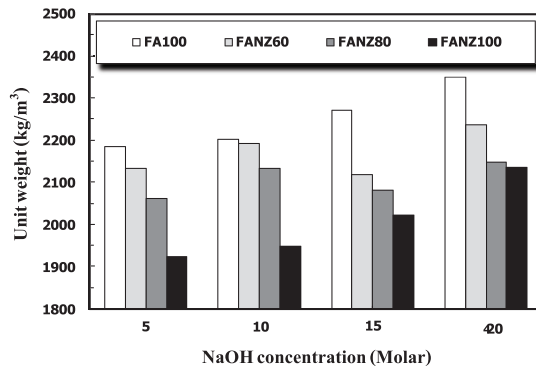
ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามผลกระทบต่างๆ พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 9



(ก) อิทธิพลของอัตราส่วน Na₂SiO₃/NaOH



(ข) อิทธิพลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder



(ค) อิทธิพลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์

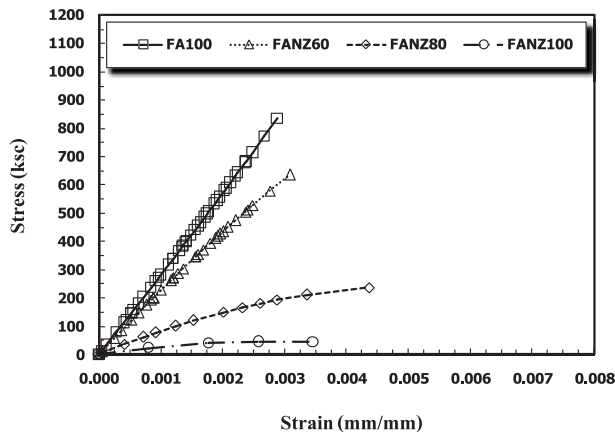
รูปที่ 9 หน่วยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากผลกระทบต่างๆ

เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง และที่การแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน อีกทั้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาจีโอพอลิเมอร์มวลเบา

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าแนวโน้มของกราฟมีความชันลดลงและความเค้นมีค่าลดลงแต่ความเครียดมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะเส้นกราฟคล้ายพาราโบลาคว่ำคล้ายกับคอนกรีตทั่วไป และพฤติกรรมการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในช่วงเริ่มต้นมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดที่

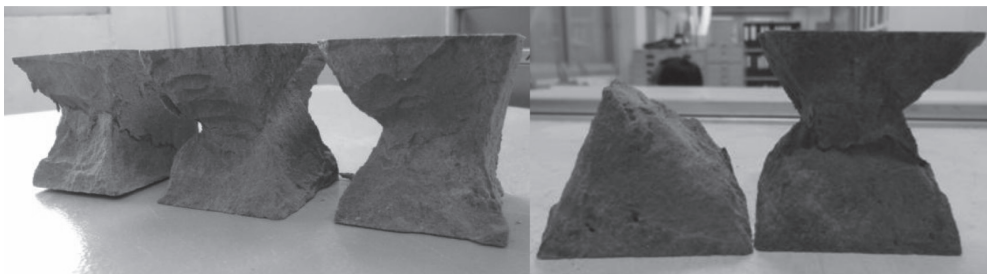
จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์รับแรงกดอัดได้ประมาณร้อยละ 40-70 ของกำลังอัดประลัย จากนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะที่โค้งมากขึ้นและเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ (microcrack) อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อแรงกระทำสูงขึ้นรอยแตกร้าวจะเกิดและขยายใหญ่มากขึ้นและพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีความโค้งมากขึ้น จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ นอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยทั้งหมดในส่วนผสมซึ่งมีกำลังอัดสูง พบว่าเมื่อถึงจุดกำลังอัดประลัยกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการวิบัติอย่างรุนแรงและทันทีทันใดในทางตรงกันข้ามกับจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ของการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่าการใช้ถ้ำลอยทั้งหมดในส่วนผสมพบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ และมีค่าความเครียดสูง ซึ่งแสดงว่ามีความเหนียวในแนวแกน (axial ductility) ที่สูงขึ้น



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

จากรูปที่ 11 พบว่าลักษณะการวิบัติจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีการวิบัติเกิดขึ้นได้ทั้งสามลักษณะคือแบบเฉือนหรือรูปกรวย แบบผ่าซีกหรือแนวตรง และแบบระเบิด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ และปริมาณการแทนที่ของซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอย พบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 100 ถึง 700 กก./ซม.² มีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนหรือรูปกรวย และจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 700 ถึง 950

กก./ซม.² มีลักษณะการวิบัติแบบระเบิด ส่วนลักษณะการวิบัติแบบผ่าซีกหรือแนวตรงของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์นั้นถือเป็นส่วนน้อยของการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบว่าลักษณะการวิบัติของการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยมีแนวโน้มที่มีการวิบัติแบบเฉือนหรือรูปกรวย เนื่องจากมีกำลังอัดที่ต่ำและมีความเหนียวในแนวแกนมากกว่าการใช้ถ้ำลอยทั้งหมดในส่วนผสม ดังแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 11 ลักษณะการวิบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ในกรณีที่วัสดุเปราะต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยว (cohesion) ระหว่างอนุภาคในวัสดุนั้น มุมที่เกิดการวิบัติจะไม่ทำมุม 45 องศา กับแนวราบตามที่สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ Mohr's circle แต่มุมดังกล่าวจะเป็น function กับมุมของความเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคในวัสดุด้วย โดยทั่วไปแล้วค่าของมุมที่เกิดการวิบัติของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานจะอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 องศา แต่สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เป็นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าของมุมที่เกิดการวิบัติอยู่ในช่วง 30 ถึง 45 องศา อาจเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นมอร์ตาร์และมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต อีกทั้งงานวิจัยครั้งนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C 109 [10] ที่ให้ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ส่งผลให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน (ASTM C 109) ทำให้รูปแบบของการวิบัติและความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่างจากการวิบัติทั่วไป อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างทดสอบเป็นทรงลูกบาศก์ซึ่งมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกทำให้การขยายตัวทางด้านข้างน้อยกว่า จึงทำให้สภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเปลี่ยนไป

5. สรุปผลการทดสอบ

1) การแทนที่โคบอลต์ในแก้วลอยร้อยละ 60 และ 80 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5-2.0 อัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ให้ค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ซึ่งมีค่า

กำลังอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 220-630 กก./ซม.² และร้อยละ 46-79 ตามลำดับ

2) อัตราส่วน Liquid alkaline/binder ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้แต่กำลังลดลง และอัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50-0.60 มีความเหมาะสมที่สุดทั้งค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีค่ากำลังอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 240-580 กก./ซม.² และร้อยละ 46-84 ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50

3) การแทนที่แก้วลอยด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวให้มากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนงานวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

7. เอกสารอ้างอิง

1. Davidovits, J., 1982, "Mineral Polymers and Methods of Making Them", *United States Patent no. 4349386*.
2. Davidovits, J., 1994, "Properties of Geopolymer Cements", *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concrete*, Kiev State Technical University, Vol. 1, pp. 131-149.
3. Davidovits, J., 1999, "Chemistry of Geopolymeric Systems", *Terminology Proceeding* :

2nd International Conference on Geopolymer, Paris, France, pp. 9-40.

4. Hardjito, D., Wallah, S.E, Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., 2004, "On the Development of Fly Ash Based Geopolymer Concrete", *ACI Mater Journal*, Vol. 101, No. 6, pp. 467-472.

5. Bakharev, T., 2006, "Thermal Behavior of Geopolymers Prepared using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 6, pp. 1134-1147.

6. Sprynskyy, M., Buszewski, B., Terzyk, A.P., and Namiesnik, J., 2007, "Study of the Selection Mechanism of Heavy Metal Adsorption on Clinoptilolite", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 304, pp. 21-28.

7. Castaldi, P., Santona, L., Enzo, S., and Melis, P., 2008, "Sorption Processes and XRD Analysis of a Natural Zeolite Exchanged with Pb²⁺, Cd²⁺ and Zn²⁺ Cations", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 156, pp. 428-434.

8. American Society for Testing and Materials., 2007, "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", *Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a, ASTM C 1437-07*.

9. American Society for Testing and Materials., 2008, "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicate Needle", *Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08, ASTM C 191-08*.

10. American Society for Testing and Materials., 2002, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar", *Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02, ASTM C 109/C 109M-02*.

11. ธนากร ภูเงินขำ, วีรวัฒน์ สิ้นศิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2553, "การศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลต์ธรรมชาติ", *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี*, MAT. 119-124.

12. Hardjito, D., Wallah, S.E, Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., 2004, "Factors Influencing the Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete", *Civil Engineering Dimention*, Vol. 6, No. 2, pp. 88-93.

13. Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V., 2007, "Workability and Strength of Coarse Fly Ash Geopolymer", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 224-229.

14. Nguyen Van Chanh, Bui Dang Trung, and Dang Van Tuan, 2008, "Geopolymer Concrete", *The 3rd ACF International Conference ACF/VCA 2008*, pp. 235-241.

15. Daniel, L.Y.Kong, and Jay, G. Sanjayan, 2008, "Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 986-991.

16. Detphan, S. and Chindaprasirt, P., 2009, "Preparation of Fly Ash and Rice Husk Ash Geopolymer", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 16, No. 6, pp. 720-726.

17. Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., and Primraksa, K., 2009, "Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 168, No. 1, pp. 44-50.

18. Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P., 2010, "Compressive Strength and Degree of Reaction of Bio-mass and Fly Ash Based Geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 236-240.

19. Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., and Gomez, L., 2010, "Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation of Natural Zeolite", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2084-2090.

20. Hardjito, D., Chua Chung Cheak., and Carrie Ho Lee Ing., 2008, "Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Mortar", *Modern Applied Science*, Vol. 2, No. 4, pp. 3-11.

21. Ravindra, N. and Somnath, G., 2009, "Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 4, pp. 68-74.
22. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Finness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 425-428.
23. Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., and Chindapasirt, P., 2010, "Compressive Strength and Modulus of Elastic and Water Permeability of Inorganic Polymer Concrete", *Materials and Design*, Vol. 24, pp. 236-240.
24. Jaarsveld, J.G.S.van., Deventer, J.S.J.van., and Lukey, G.C., 2002, "The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly ash and Kaolinite Based Geopolymer", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 89, pp. 63-73.