

อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีต่อไฮบริดซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับวัสดุซ่อมอุดในคานคองกรีต

Influence of NaOH Concentration and Sand to Binder Ratio on Hybrid Cement Mortar for Filled Materials in Notched Concrete Beam

สกวรรณ ทานจิตสุวรรณ¹ ธวัชชัย โทอินทร์^{2*} และธนากร ภูเงินขำ³

Sakonwan Hanjitsuwan¹ Tawatchai Tho-in^{2*} and Tanakorn Phoo-ngernkham³

Received: August 29, 2021; Revised: September 27, 2021; Accepted: September 27, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตที่มีการใช้เถ้าลอย-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมอุด ผลการศึกษาพบว่ากำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากและใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมแซมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยที่ปัจจัยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ส่งผลต่อกำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากอย่างเห็นได้ชัด เมื่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผลิตจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ พบว่ากำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 หลังจากนั้นกำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากมีแนวโน้มลดลง ขณะที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผลิตจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 และ 14 โมลาร์ พบว่ากำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุซ่อมอุดเนื่องด้วยที่อัตราส่วนนี้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50

คำสำคัญ : ไฮบริดซีเมนต์; อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน; ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์; กำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบาก; วัสดุซ่อมแซม

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University

² Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

³ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

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

Abstract

This research investigated the effect of factors of sand to binder (S/B) ratio and sodium hydroxide (NH) concentration on flexural strength of notched beam with filled FA-PC geopolymer mortar. The tested results revealed that flexural strength of notched concrete beam with filled geopolymer mortar as repair material tended to increase as expected. The factors of NH concentration and S/B ratio for manufacturing geopolymer mortar flexural strength of notched concrete beam. The geopolymer mortar made from 6M NH concentration showed that flexural strength of notched concrete beam tended to increase with an increase in S/B ratio up to 1.25 after which the strength tended to decrease. The geopolymer mortar made from 10M and 14M NH concentration showed that flexural strength of notched concrete beam tended to decrease with an increase in S/B ratio. The S/B ratio of 1.00 was the most suitable for use as repair material due to its S/B ratio having higher homogeneity compared with the S/B ratios of 1.25 and 1.50.

Keywords: Hybrid Cement; Sand to Binder Ratio; NaOH Concentration; Flexural Strength of Notched Concrete Beam; Repair Material

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสามารถนำวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต ซึ่งถือเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดี อีกทั้งยังใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำ (ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส) [1] ในประเทศไทยวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในระบบการผลิตจีโอโพลิเมอร์ คือ เถ้าลอยที่เป็นวัสดุพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก มีส่วนของอสัณฐานในองค์ประกอบทางแร่ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยปกติเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีความสามารถในการรับกำลังได้ค่าที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) จึงจำเป็นต้องใช้ความร้อนประมาณ 40 - 90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยาทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในงานทางด้านก่อสร้างจริง [1] - [4] มีนักวิจัยที่ได้ศึกษาหาแนวทางลดข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกลของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดผลผลิตไฮดรอกซิลกับจีโอโพลิเมอร์ทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น [5] - [8] สารละลายด่างที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ในการชะละลายไอออนจากวัสดุตั้งต้น สารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาควมแน่นในกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ [9] - [10]

ทราบเป็นมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานก่อสร้าง มวลรวมสามารถช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติของวัสดุก่อสร้างโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในวัสดุ [11] ตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] แนะนำให้ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.75 สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาวัสดุชนิดใหม่เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม ซึ่งจำเป็นต้องมีสมบัติทางด้านเนื้อแน่นสม่ำเสมอ คุณภาพดี และจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเป็นอีกหนึ่งปัจจัย

ที่มีความสำคัญต่อสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ [13] นอกจากนี้การเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างก็จะทำให้สามารถพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้มีศักยภาพสามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างหลักหรือการพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานซ่อมอุดรอยแตกร้าวของโครงสร้างหลักได้ [14] - [18] ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้รับจากงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสมบัติของแก้วลอย-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่น่าสนใจในการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย แก้วลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) องค์กรประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้น แสดงในตารางที่ 1 และทรายแม่น้ำ (S) โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.80 ความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.56 และ 0.98

สารละลายต่างคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ความเข้มข้น 6 10 และ 14 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O SiO_2 และ H_2O ร้อยละ 13.89 32.15 และ 46.04 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical Ccompositions	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
Na_2O	2.94	0.40
K_2O	2.93	0.10
SO_3	7.29	2.70
LOI	0.30	10.30
Physical Properties		
Blaine Fineness (cm^2/g)	4300	3600
Mean Particle Size (μm)	8.5	14.6
Specific Gravity	2.23	3.15

2. อัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 แก้วลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ [7] ในการผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และคงที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 ทำการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 1.00 1.25 และ 1.50 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 10 และ 14 โมลาร์

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยผสมแก้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทรายให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายแล้วผสมเป็นเวลาประมาณ 3 นาที โดยก่อนนำสารละลายต่างไปใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมต้องทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนประมาณ 5 นาที

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (125 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

Samples	FA (g)	OPC (g)	NH (Molar)			NS (g)	Sand (g)
			6M NH (g)	10M NH (g)	14M NH (g)		
6M1.00S	90	10	60	-	-	40	100
6M1.25S	90	10	60	-	-	40	125
6M1.50S	90	10	60	-	-	40	150
10M1.00S	90	10	-	60	-	40	100
10M1.25S	90	10	-	60	-	40	125
10M1.50S	90	10	-	60	-	40	150
14M1.00S	90	10	-	-	60	40	100
14M1.25S	90	10	-	-	60	40	125
14M1.50S	90	10	-	-	60	40	150

3. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดสามารถทำได้โดยเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สด ลงแบบขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] ตัวอย่างที่ได้ทำการเก็บที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการก่อตัว จากนั้นทำการถอดแบบและห่อด้วยฟิล์มพลาสติกและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 50 จนครบอายุ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

4. คอนกรีต

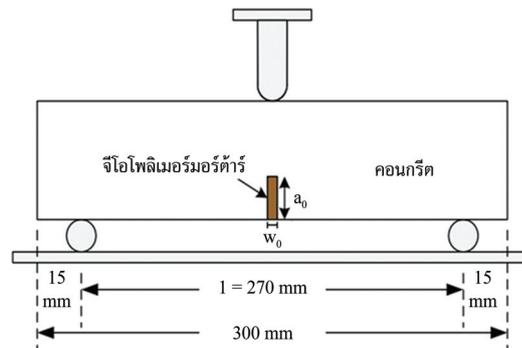
คอนกรีตที่ใช้สำหรับการทดสอบความสามารถในการประสานของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [19] วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว ซึ่งคอนกรีตที่ออกแบบมีค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 36.0 และ 8.5 เมกะปาสคาล

5. การเตรียมตัวอย่างกำลังรับแรงดัดเมื่อใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่มีการใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอด การทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐาน ASTM C293-02 [20] การเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นด้วยคอนกรีตถูกเทลงในแบบหล่อรูปทรงปริซึมขนาดหน้าตัด 75 x 75 ตารางมิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาจึงทำการถอดแบบและบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากครบอายุบ่มในน้ำตัวอย่างคอนกรีตถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลา 60 วัน หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตจะถูกตัดให้มีอัตราส่วนความสูงของรอยบาก (a_0) ต่อความลึกของตัวอย่างเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนความกว้างของรอยบาก (w_0) ต่อความสูงของรอยบากเท่ากับ 0.4 [7] ดังแสดงในรูปที่ 1

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างของการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่มีการใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดนั้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถูกเทลงในรอยบากของคอนกรีต โดยที่จีโอโพลิเมอร์

จะถูกเทเป็น 2 ชั้น เท่า ๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการหล่อแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติก หลังจากครบระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบหล่อ และเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไว้ที่ห้องบ่มอุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 50 จนอายุการบ่มครบ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่มีการใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมอุด โดยค่าที่ได้เป็นการเฉลี่ยจากการทดสอบกับตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง



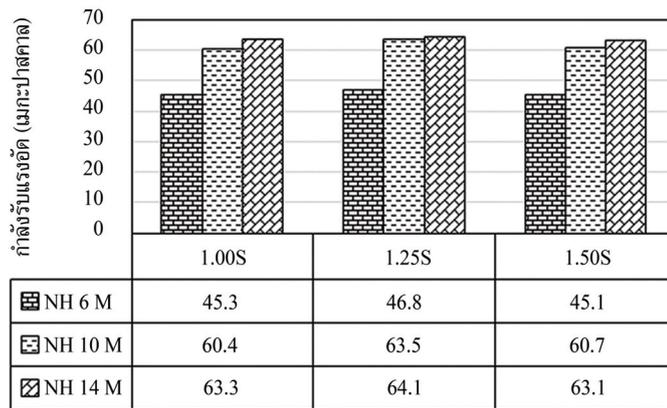
รูปที่ 1 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างในการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมอุด [7]

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงดัดของเกล็ดลอย-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทุกอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 มีแนวโน้มให้กำลังรับแรงดัดสูงสุดทุกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจเนื่องมาจากอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 เป็นปริมาณของทรายที่เหมาะสมส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วกว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50 การมีระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็วมีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลต่อความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในขั้นตอนการผสมตัวอย่าง [21] สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 เป็นส่วนผสมที่มีปริมาณทรายเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [13] หรืออาจเนื่องจากความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในวัสดุเปลี่ยนแปลงตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากค่ากำลังรับแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณทรายในส่วนผสม คือ เหตุผลที่หนึ่งเกิดจากเมื่อเพิ่มปริมาณทรายทำให้การยึดเกาะกันในส่วนผสมลดลงส่งผลทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง และเหตุผลที่สองปริมาณการเกิดเจลสารประกอบใหม่ในกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันมีไม่เพียงพอที่จะยึดอนุภาคทรายทั้งหมดทำให้โครงสร้างเกาะกันอย่างหลวม [22]

เมื่อพิจารณาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สามารถชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้นและเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์เจล (NASH) มากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการรับกำลังดัดที่เพิ่มขึ้น [3]



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดที่อายุ 28 วัน

2. กำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอด

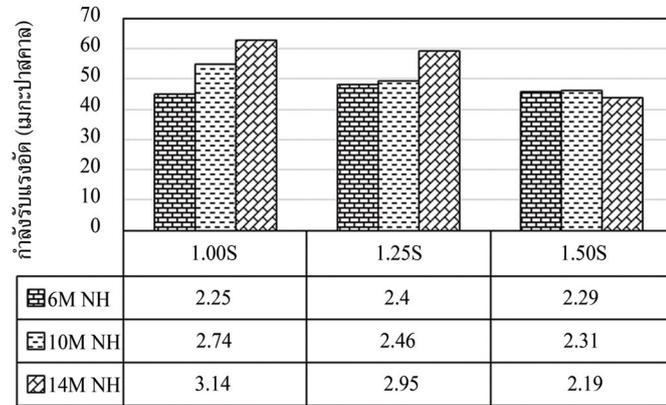
ปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าเมื่อทำการซ่อมแซมด้วยจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ค่ากำลังรับแรงคดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 1.00S และ 1.25S ที่มีค่ากำลังรับแรงคดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ 1.50S กำลังรับแรงคดลดลงเมื่อความเข้มข้นของ NH มากกว่า 10 โมลาร์ เหตุผลหนึ่งอาจเนื่องจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากพื้นผิวสัมผัสของคอนกรีตสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยตั้งต้นส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น [23] - [24] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่ยังไม่ได้ทำการซ่อมมอด (1.70 เมกะปาสคาล) ซึ่งกำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตที่ความเข้มข้นของ NH 6 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน 1.25 ให้กำลังรับแรงคดสูงสุด แต่เมื่อจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 และ 14 โมลาร์ พบว่ากำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตที่ใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผลิตจากอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50 อาจเนื่องจากจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 เป็นปริมาณของทรายที่มีความเหมาะสมที่ทำให้วัสดุผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50

เมื่อพิจารณาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ากำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สามารถละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้น ซึ่งซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกออกมาสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากพื้นผิวสัมผัสของคอนกรีตส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น [24]

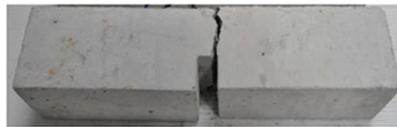
3. ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4(ก) - (ง) แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซมด้วยจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่าลักษณะการวิบัติของกำลังรับแรงเฉือนคดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) การวิบัติเกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อระหว่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ไม่ดี ได้แก่ 6M1.00S 6M1.25S 10M1.25S 10M1.50S 14M1.25S และ 14M1.50S และ 2) การวิบัติเกิดผ่านเนื้อของคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ รอยแตกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างและเป็นการวิบัติที่สอดคล้องกับการเป็นคอนกรีตที่ตีมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ได้แก่ 6M1.50S 10M1.00S และ 14M1.00S ซึ่งสอดคล้อง

กับรายงานวิจัย [25] ที่ได้มีการรายงานไว้ว่าลักษณะการแตกระหว่างคอนกรีตเดิมกับจีโอโพลีเมอร์แบบเสาะแสดงถึงการยึดเหนี่ยวที่สูงระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ อีกทั้งจากงานวิจัยดังกล่าวยังได้สรุปเพิ่มเติมไว้ว่าการยึดเกาะที่ดีของจีโอโพลีเมอร์กับคอนกรีตเดิมเป็นการเพิ่มทางเลือกที่น่าสนใจการเลือกใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุซ่อมแซมทางการค้า



รูปที่ 3 กำลังรับแรงคัดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมอุดที่อายุ 28 วัน



(ก) คอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซม



(ข) 6M1.00S



(ค) 10M1.00S



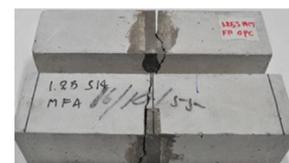
(ง) 14M1.00S



(จ) 6M1.25S



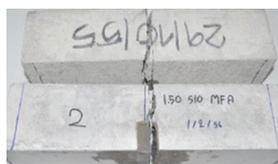
(ฉ) 10M1.25S



(ช) 14M1.25S



(ซ) 6M1.50S



(ฅ) 10M1.50S



(ณ) 14M1.50S

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบที่อายุ 28 วัน

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดสูงสุด (64.1 และ 2.95 เมกะปาสคาล) และเมื่อประยุกต์ใช้งานจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดูในคานคองกรีตที่มีรอยบากพบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และ 1.25 ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างเนื้อจีโอโพลิ-เมอร์มอร์ตาร์กับผิวคองกรีตดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแนวโน้มของกำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตเพิ่มขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

References

- [1] Bakharev, T. (2006). Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. **Cement and Concrete Research**. Vol. 36, Issue 6, pp. 1134-47. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.03.022
- [2] Chindapasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 29, Issue 3, pp. 224-229. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002
- [3] Rattanasak, U. and Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. **Minerals Engineering**. Vol. 22, Issue 12, pp. 1073-1078. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.03.022
- [4] Phoo-ngernkham, T., Chindapasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., and Hatanaka, S. (2014). The Effect of Adding Nano-SiO₂ and Nano-Al₂O₃ on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. **Materials & Design**. Vol. 55, pp. 58-65. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.049
- [5] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindapasirt, P. (2014). Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive. **Materials & Design**. Vol. 53, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07
- [6] Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., and Chindapasirt, P. (2015). Effects of Sodium Hydroxide and Sodium Silicate Solutions on Compressive and Shear Bond Strengths of FA-GBFS Geopolymer. **Construction and Building Materials**. Vol. 91, pp. 1-8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.001
- [7] Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridthirud, C., Hatanaka, S., Chindapasirt, P. (2018). High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement for use as Repair Material. **Construction and Building Materials**. Vol. 98, pp. 482-488. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.139

- [8] 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 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. **Cement and Concrete Research**. Vol. 41, Issue 9, pp. 923-931. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.05.006
- [9] Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. In: Davidovits, J. D. R., James, C., Editor. In **Proceedings of Geopolymer Second International Conference**. Saint-Quentin. pp. 9-39
- [10] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N., and Chindaprasirt, P. (2017). Effect of Sodium Hydroxide and Sodium Silicate Solutions on Strengths of Alkali Activated High Calcium Fly Ash Containing Portland Cement. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 21, Issue 6, pp. 2202-2210. DOI: 10.1007/s12205-016-0327-6
- [11] Phoo-ngernkham, T. and Sinsiri, T. (2011). A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Neutral Zeolite. **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 34, No. 1, pp. 31-44 (In Thai)
- [12] 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.
- [13] 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**. Vol. 4, No. 4, pp. 68-74
- [14] Keyu, C., Dazhi, W., Ming, Y., Qimao, C., and Zhenying, Z. (2021). Mechanical and Durability Properties of Metakaolin Blended with Slag Geopolymer Mortars used for Pavement Repair. **Construction and Building Materials**. Vol. 281, p. 122566. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122566
- [15] Albidah, A., Abadel, A., Alrshoudi, F., Altheeb, A., Abbas, H., and Al-Salloum, Y. (2020). Bond Strength Between Concrete Substrate and Metakaolin Geopolymer Repair Mortars at Ambient and Elevated Temperatures. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 9, Issue 5, pp. 10732-10745. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.092
- [16] Yan-Shuai, W., Kai-Di, P., Yazan, A., and Jian-Guo, D. (2021). The Bond Between Geopolymer Repair Mortars and OPC Concrete Substrate: Strength and Microscopic Interactions. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 119, p.103991. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103991
- [17] Zanotti, C., Borges, P. H. R., Bhutta, A., and Banthia, N. (2017). Bond Strength Between Concrete Substrate and Metakaolin Geopolymer Repair Mortar: Effect of Curing Regime and PVA Fiber Reinforcement. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 80, pp. 307-316. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.12
- [18] 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)
- [19] ACI 211.1-91. (1991). **Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, HeavyWeight, and Mass Concrete**. American Concrete Institute

- [20] ASTM C293-02. (2002). **Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.
- [21] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., and Chindaprasirt, P. (2016). Influence of Sand to Binder Ratio on Properties of Geopolymer Mortar Containing Portland Cement. **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 39, No. 2, pp. 127-137 (In Thai)
- [22] Guades, E. J. (2016). Experimental Investigation of the Compressive and Tensile Strengths of Geopolymer Mortar: The Effect of Sand/Fly Ash (S/FA) Ratio. **Construction and Building Materials**. Vol. 127, pp. 484-493. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.030
- [23] Hu, S., Wang, H., Zhang, G., and Ding, Q. (2008). Bonding and Abrasion Resistance of Geopolymeric Repair Material Made with Steel Slag. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 30, Issue 3, pp. 239-244. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.04.004
- [24] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. P., and Jalali, S. (2008). Adhesion Characterization of Tungsten Mine Waste Geopolymeric Binder. Influence of OPC Concrete Substrate Surface Treatment. **Construction and Building Materials**. Vol. 22, Issue 3, pp. 154-161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.005
- [25] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Suksiripattanapong, C., Thumrongvut, J., Suebsuk, J., and Sookasem, S. (2016). Flexural Strength of Notched Concrete Beam Filled with Alkali-Activated Binders Under Different Types of Alkali Solutions. **Construction and Building Materials**. Vol. 127, pp. 673-678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.053