

อิทธิพลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนสารละลายต่างที่แตกต่างกันใน
จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดสำหรับใช้เป็น
วัสดุซ่อมแซม

Influence of Ordinary Portland Cement and Different Alkali Solution Ratio in Geopolymer Mortar on Time of Setting and Compressive Strength for use as A Repaired Materails

ธวัชชัย โทอินทร์^{1*} เชิดสกุล ลาตุลี² ธนากร ภูเงินขำ² ปราชญ์ อมรภิญโญ¹ สุบรร ผลกะสิ¹ และภคพร ยอดศิริ¹
Tawatchai Tho-In^{1*} Chirdsakul Latulee² Tanakorn Phoo-ngernkham²
Prach Amornpinyo¹ Suban Phonkasi¹ and Pakaphorn Yodsiri¹

Received: August 21, 2021; Revised: September 16, 2021; Accepted: September 18, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงเฉือนอัดของ
เกล็ดลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม เกล็ดลอยแคลเซียมสูง
ถูกใช้เป็นวัสดุตั้งต้นและแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนัก
สารละลายต่างที่ใช้ในการชะละลายเกล็ดลอย ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ และ
สารละลายโซเดียมซิลิเกต ทำการแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
เท่ากับ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก คงที่อัตราส่วนของสารละลายต่างต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60
และไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรต์เซชันด้วยความร้อน จากการศึกษาพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถเร่ง
การก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้อย่างชัดเจน และตัวอย่าง 2.5FA80
สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงถึง 66.1 เมกะปาสคาล นอกจากนั้นยังพบว่าแรงยึดเกาะระหว่าง
ระบบซีเมนต์และระบบจีโอโพลิเมอร์ร่วมกับระบบซีเมนต์ดีกว่าระบบซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ : เกล็ดลอยแคลเซียมสูง; อัตราส่วนสารละลายต่าง; ปูนซีเมนต์; ระยะเวลาการก่อตัว; กำลัง

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

¹ Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author E - mail Address: tawatchai.to@rmuti.ac.th

Abstract

This research aims to study the time of setting, compressive strength, and slent shear strength of high-calcium fly ash geopolymer mortar containning ordinary portland cement. The high-calcium fly ash was used as binder and replaced with ordinary portland cement of 0 and 20 wt%. 10 molar sodium hydroxide solution and sodium silicate solution were used as alkali activated solution for leaching fly ash. The ratio of sodium silicate solution to sodium hydroxide solution was adjusted to 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 by weight. The liquid-to-binder ratio is 0.60 and the geopolymerization is not activated with high temperature. The results show ordinary portland cement and an increase in the ratio of sodium silicate solution to sodium hydroxide solution can clearly accelerate time of setting of geopolymer mortars, and the compressive strength can increase up to 66.1 MPa. In addition, it was found that the adhesion between the cement system and the geopolymer system corporated with the cement system was better than that of the cement system alone.

Keywords: High-Calcium Fly Ash; Alkali Solution Ratio; Portland Cement; Time of Setting; Strength

บทนำ

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ถูกศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลหลายสิบปี และแน่นอนว่าการผลิตจีโอโพลิเมอร์ทั้งในรูปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสามารถให้สมบัติด้านกำลังและความทนทานได้เช่นเดียวกับคอนกรีตธรรมดา [1] โดยทั่วไปจีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization Reaction) ในขณะที่คอนกรีตธรรมดาสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ได้ทันทีเมื่อเม็ดปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ สำหรับวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คือ เถ้าลอย ไม่ว่าจะเป็นประเภทแคลเซียมสูงหรือแคลเซียมต่ำก็สามารถใช้ได้ ในประเทศไทยส่วนมากจะเป็นเถ้าลอยประเภทที่มีแคลเซียมสูงและเป็นผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยดังกล่าวมีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมเป็นหลัก จึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ [2] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตหรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแต่ยังต้องเผชิญกับปัญหาในเรื่องของการพัฒนากำลังที่ช้าเมื่อไม่ถูกกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อน ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40 - 90 องศาเซลเซียส [3] จากเหตุผลดังกล่าวได้มีการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ให้สามารถเพิ่มกำลังขึ้นได้โดยไม่ต้องอาศัยความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน เช่น การใช้น้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบของจีโอโพลิเมอร์สามารถเพิ่มปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (CASH)

และอยู่ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล (NASH) สามารถเร่งการก่อตัวและการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ ให้สามารถพัฒนากำลังอัดได้ [4] นอกจากนี้ความสำคัญของการสามารถในการชะละลายซิลิกาอลูมินา ออกจากวัสดุตั้งต้นเป็นสิ่งที่สำคัญมากเช่นกัน ความเข้มข้น และประเภทของสารละลายต่างมีผลโดยตรง ต่อความสามารถในการเกิดจีโอโพลิเมอร์เจลซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติด้านกำลังและความทนทานของ จีโอโพลิเมอร์ สารละลายต่างที่เป็นที่รู้จัก ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถูกนำมาใช้เป็นตัวชะละลาย แก้วลอยร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ช่วยควบแน่นปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของจีโอโพลิเมอร์ [5] ทำให้ ลัดส่วนการใช้งานของสารละลายต่างทั้งสองมีความสำคัญเนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อการเกิดจีโอโพลิเมอร์เจล

ปัญหาของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ค่อนข้างยากคือ การแตกร้าว และการหลุดร่อน เนื่องจากปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าวนั้นมีอยู่หลากหลาย เช่น ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม น้ำ การผลิต การลำเลียง การเทลงแบบหล่อ การทำให้แน่น การบ่ม การใช้งาน การดูแลรักษา รวมไปถึงสภาพแวดล้อม ที่คอนกรีตนั้นต้องสัมผัสไม่ว่าจะเป็นความชื้นหรือความร้อน เป็นต้น ปัจจุบันปัญหาเรื่องการแตกร้าวและ หลุดร่อนแก้ไขโดยการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาดคือ วัสดุกลุ่มอีพ็อกซี (Epoxy Agents) ความสามารถในการใช้งานขึ้นอยู่กับรูปแบบของการแตกร้าวและหลุดร่อน ที่สำคัญราคาเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการใช้งาน อีพ็อกซี เนื่องจากอีพ็อกซีที่มีคุณภาพสูงจะมีราคาแพง ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะออกแบบผลิตภัณฑ์ ที่สามารถใช้ประสานรอยแตกร้าวและหลุดร่อนของคอนกรีตทดแทนการใช้งานอีพ็อกซีที่ขายตามท้องตลาด โดยมีการศึกษาถึงความสามารถในการรับแรงเฉือนอัด (Slant Shear Strength) ที่เกิดขึ้นที่ผิวของ คอนกรีตและวัสดุจีโอโพลิเมอร์และพบว่ารอยเชื่อมประสานสามารถรับแรงเฉือนอัดได้ดี โดยมีการศึกษา ถึงความสามารถในการรับแรงเฉือนอัด (Slant Shear Strength) ที่เกิดขึ้นที่ผิวของคอนกรีตและ วัสดุจีโอโพลิเมอร์และพบว่ารอยเชื่อมประสานสามารถรับแรงเฉือนอัด [6] - [7] และรวมไปถึงการศึกษา รอยต่อระหว่างโครงสร้างคอนกรีตเก่าและโครงสร้างคอนกรีตใหม่ให้มีความสามารถในการยึดเหนี่ยวกับ เหล็กเสริมได้แข็งแรงขึ้น [8]

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงเฉือนอัด ระหว่างคอนกรีตธรรมดากับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม ไม่มีการกระตุ้น ปฏิกิริยาด้วยความร้อน โดยทำการทดสอบสมบัติด้านกำลังที่อายุ 17 และ 28 วัน นอกจากนี้แล้วผลการทดสอบ อาจสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบการซ่อมแซมการแตกร้าวของคอนกรีตได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

1.1 วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย แก้วลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) และทรายแม่น้ำ (S) โดยที่องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นและสมบัติทางกายภาพที่สำคัญดังตารางที่ 1 และ 2 สารละลายต่างที่ใช้ ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) เข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O ร้อยละ 11.67, SiO_2 ร้อยละ 28.66 และ H_2O ร้อยละ 59.67

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

สมบัติทางเคมี	FA (ร้อยละ)	OPC (ร้อยละ)
SiO ₂	36.93	20.80
Al ₂ O ₃	18.10	4.70
Fe ₂ O ₃	11.91	3.40
CaO	21.41	65.30
MgO	2.78	1.50
Na ₂ O	1.42	0.40
K ₂ O	2.28	0.10
SO ₃	2.90	2.70
LOI	1.54	0.90

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพ	FA	OPC	S
ความถ่วงจำเพาะ 2.65	3.15	2.63	
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d ₅₀ (ไมครอน)	15.4	14.6	-
ความละเอียด (ตารางเซนติเมตร/กรัม)	4300	3600	-
โมดูลัสความละเอียด -	-	1.80	
การดูดซึมน้ำ -	-	0.98	

1.2 การเตรียมตัวอย่าง อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังตารางที่ 3 แก้วลอยเคลือบสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คงที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 1.0 1.5 2.0 และ 2.5

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตัวอย่าง	FA (g)	OPC (g)	S (g)	NS (g)	NH (g)
1.0FA100	100	-	100	30	30
1.5FA100	100	-	100	36	24
2.0FA100	100	-	100	40	20
2.5FA100	100	-	100	43	17
1.0FA80	80	20	100	30	30

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	FA (g)	OPC (g)	S (g)	NS (g)	NH (g)
1.5FA80	80	20	100	36	24
2.0FA80	80	20	100	40	20
2.5FA80	80	20	100	43	17

การเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดถูกดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิห้องประมาณ 25 - 30 องศาเซลเซียส และเตรียมตัวอย่างตามสัดส่วนผสมในตารางที่ 3 โดยเริ่มด้วยการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และปล่อยให้เวลา 60 วินาที ในเครื่องผสมอัตโนมัติ ดังรูปที่ 1 ค่อย ๆ เติมทรายให้หมดภายใน 10 วินาที ผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 20 วินาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) และทำการผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 60 วินาที จะได้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดที่พร้อมสำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดที่ได้ถูกเทลงในแบบหล่อตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ปาดผิวให้เรียบแล้วทำการหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นแกะแบบและทำการหุ้มด้วยพลาสติกอีกครั้ง และเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 23 - 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 จนครบอายุการทดสอบ ในขณะที่การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดมีการเตรียมตัวอย่างลักษณะเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแต่ใช้ตัวอย่างรูปทรงปริซึมขนาดหน้าตัด 50 x 50 ตารางมิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 เครื่องผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

2. การทดสอบตัวอย่าง

2.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดัดแปลงตามมาตรฐาน ASTM C191 [9] ดังรูปที่ 2 ทำการหาระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายที่เกิดขึ้น โดยระยะเวลาการก่อตัวต้นเริ่มจากทันทีที่สารละลาย NH สัมผัสกับเกลือจนถึงเวลาที่เข็มทดสอบจมลง

ในเนื้อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลิก 25 มิลลิเมตรพอดี และระยะเวลาการก่อตัวปลายจะนับต่อเนื่องจนกระทั่งเข็มทดสอบเริ่มหรือพอดีทำให้ผิวจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่เกิดรอย



รูปที่ 2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 4 โดยมีอัตราการให้แรงประมาณ 1,200 นิวตันต่อวินาที ตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วงอายุ ได้แก่ 1 7 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 3 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

2.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดเป็นการตรวจสอบความสามารถในการยึดเหนี่ยวกันระหว่างพื้นผิวที่เป็นคอนกรีตธรรมดาและจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตัวอย่างคอนกรีตธรรมดาถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [11] และมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 35.8 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน (ใช้มวลรวมหยาบขนาด 4.5 - 9.5 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดตัวอย่าง) โดยคอนกรีตสดที่ได้ถูกเทลงแบบหล่อตัวอย่างรูปปริซึมขนาดหน้าตัด 50×50 ตารางมิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร ปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 - 30 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบและบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน นำก้อนตัวอย่างขึ้นจากการบ่มด้วยน้ำและปล่อยให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 15 นาที

หลังจากนั้นหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นแล้วทำการเก็บตัวอย่างในห้องบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 23 - 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 60 วัน รวมระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเท่ากับ 90 วัน ทั้งนี้เพื่อให้ตัวอย่างคอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่สมบูรณ์ [12] - [13]



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

หลังจากอายุครบ 90 วัน ตัวอย่างคอนกรีตถูกตัดเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน โดยวางตัวอย่างในแนวนอนและแนวการตัดทำมุม 30 องศากับแนวราบ แล้วทำการตัดตัวอย่างด้วยเครื่องตัดคอนกรีตที่มีความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที ด้วยวิธีการตัดแห้ง ทำความสะอาดตัวอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่บริเวณรอยตัด ต้องมีความสะอาดปราศจากฝุ่นและต้องแห้ง แล้ววางลงในแบบหล่อรูปปริซึมขนาดหน้าตัด 50 x 50 ตารางมิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร ทำการเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดลงในแบบหล่อที่มีตัวอย่างคอนกรีตบรรจุอยู่ก่อนหน้าแล้วให้เต็มแบบหล่อ ท่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดแบบและทำการหล่อด้วยพลาสติกอีกครั้ง นำตัวอย่างเก็บไว้ในห้องบ่มที่มีการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 23 - 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 จนครบอายุการทดสอบที่ 1 7 และ 28 วัน การเตรียมการทดสอบดังรูปที่ 5 สำหรับค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนอัดแต่ละส่วนผสมได้จากแท่งปริซึมตัวอย่าง 3 แท่ง โดยการทดสอบเป็นการประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM C882 [14]



รูปที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัด

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ระยะเวลาก่อตัว

การทดสอบหาระยะการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแปรผันของอัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 พบว่า เมื่อไม่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน NS/NH ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายมีค่าต่ำสุดได้แก่ 2.5FA80 มีค่าเท่ากับ 7 และ 12 นาที ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายมีค่าสูงสุดได้แก่ 1.0FA100 มีค่าเท่ากับ 25 และ 46 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการแทนที่ปริมาณเถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายเร็วขึ้นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 23.1 และร้อยละ 29.4 เป็นของ 2.0FA80 และ 2.5FA80 สำหรับ 2.5FA80 พบว่าช่วงระหว่างเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายสั้นลง (เร็วขึ้น) ถึงร้อยละ 37.5 ดังตารางที่ 4

จากระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วขึ้นมีความเป็นไปได้ว่า 1) ความหนืดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สด อันเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของ NS ที่มีความหนืดสูงกว่า NH ทำให้ความสามารถในการชะละลายของ NH ที่กระทำกับเถ้าลอยไม่ยากและประกอบกับเมื่อ NS/NH มีค่าสูง ปริมาณของ NH จะต่ำลง ทำให้ความสามารถในการชะละลายลดลงร่วมด้วยส่งผลให้เกิดการก่อตัวที่เร็วขึ้นแต่อาจจะไม่สมบูรณ์เนื่องจากความสามารถในการชะละลายไม่ดี และ 2) การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยอาศัยน้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบทั้ง NH และ NS เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมที่อยู่ในเม็ดปูนโดยเฉพาะอย่างยิ่งไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) รวมไปถึงไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ที่ก่อให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เป็นหลัก ซึ่งการมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมเท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุตั้งต้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นอย่างชัดเจน [3], [15]

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตัวอย่าง	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)		
	การก่อตัวต้น (A)	การก่อตัวปลาย (B)	(B) - (A)
1.0FA100	25	46	21
1.5FA100	18	32	14
2.0FA100	13	20	7
2.5FA100	9	17	8
1.0FA80	20 (20.0)*	39 (15.2)	19 (9.5)
1.5FA80	15 (16.7)	26 (18.7)	11 (21.4)
2.0FA80	10 (23.1)	16 (20.0)	6 (14.3)
2.5FA80	7 (22.2)	12 (29.4)	5 (37.5)

* หมายถึง ร้อยละการก่อตัวที่เร็วขึ้นเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม

2. กำลังรับแรงอัด

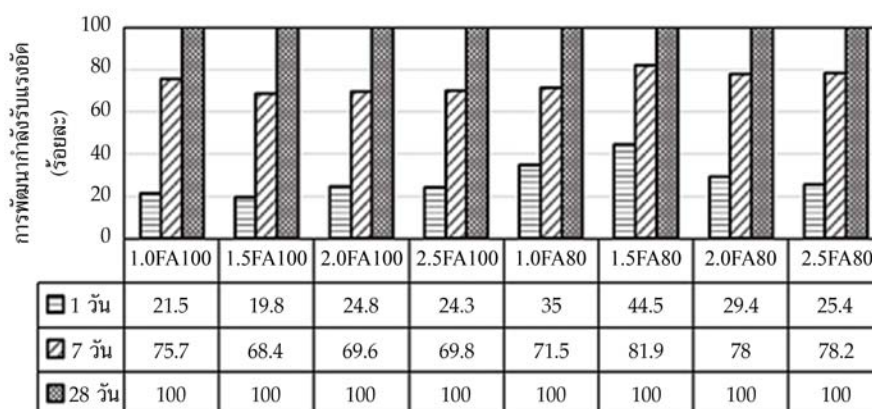
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 1 7 และ 28 วัน โดยไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาคด้วยความร้อนดังตารางที่ 5 พบว่ากำลังรับแรงอัดของทุกตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และสามารถเพิ่มสูงสุดเท่ากับ 66.1 เมกะปาสคาล เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมี NS/NH เท่ากับ 2.5 คือ 2.5FA80 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าระหว่าง 6.0 - 39.1 และ 16.8 - 66.1 เมกะปาสคาล ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของ NS/NH ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุ 1 วัน แต่หลังจากนั้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทุกตัวอย่างมีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตาม NS/NH ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นพบว่าในทุกอายุการทดสอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถช่วยให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับซิลิกาจากวัสดุตั้งต้น เป็นการเพิ่มผลผลิตภายในระบบจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะอยู่ร่วมกับผลผลิตจีโอโพลิเมอร์เจล (NASH, CASH) ช่วยให้เนื้อพาสต์ของจีโอโพลิเมอร์มีความหนาแน่นขึ้นจึงส่งผลเชิงบวกต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ แม้ว่าจะไม่ถูกกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรต์เซชันด้วยความร้อนก็ตาม [3] - [4], [15]

นอกจากนั้นจากปริมาณของ NH ที่ลดลง (ค่า NS/NH เพิ่มขึ้น) ทำให้ความสามารถในการชะละลายเถ้าลอยลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรต์เซชัน อย่างไรก็ตามน้ำที่เป็นองค์ประกอบภายในของ NH บางส่วนทำปฏิกิริยากับเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิด CSH และเกิดการเสริมแรงกันหรือทำให้เนื้อของเจลแน่นขึ้นทั้งจีโอโพลิเมอร์เจลและซีเมนต์เจล ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.0FA100	6.9	24.3	32.1
1.5FA100	7.4	25.5	37.3
2.0FA100	9.3	26.1	37.5
2.5FA100	9.5	27.3	39.1
1.0FA80	19.8	40.4	56.5
1.5FA80	26.1	48.0	58.6
2.0FA80	18.2	48.3	61.9
2.5FA80	16.8	51.7	66.1

จากตารางที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการพัฒนา กำลังรับแรงอัด โดยที่อายุ 1 และ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 19.8 - 44.5 (เฉลี่ยร้อยละ 32.1) และ 68.4 - 81.9 (เฉลี่ยร้อยละ 75.1) ตามลำดับ และ 1.5FA80 มีความสามารถในการพัฒนา กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 1 และ 7 วัน เท่ากับร้อยละ 44.5 และ 81.9 จะเห็นได้ว่า NS/NH ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ในทุกสัดส่วนผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมซึ่งมีความต้องการน้ำ เพื่อสร้างซีเมนต์เจล ดังนั้นเมื่อ NS/NH ต่ำนั้นหมายถึง ปริมาณน้ำมีมากทำให้มีการเกิด CSH เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงตามอายุที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น 1.0FA80 และ 1.5FA80 แต่ผลการวิจัยไม่เด่นชัด มากนักกับ 1.0FA100 และ 1.5FA100 ทั้งนี้อาจเนื่องจากขาดการกระตุ้นด้วยความร้อนจากภายนอก



รูปที่ 6 การพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3. กำลังรับแรงเฉือนอัด

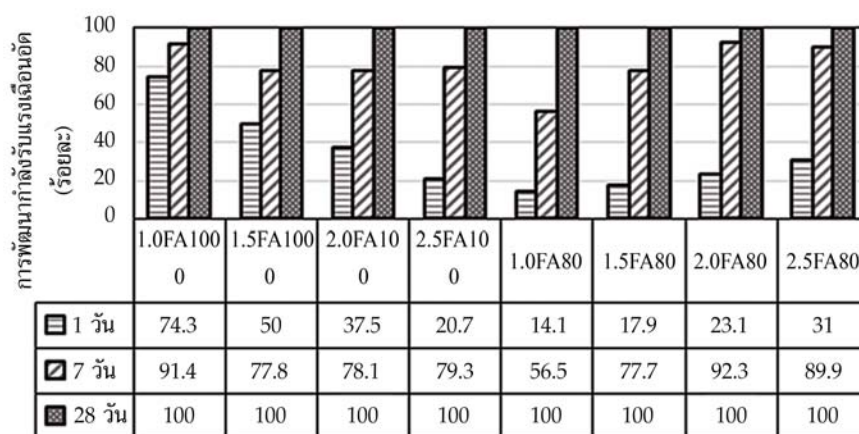
จากการทดสอบพบว่า ความสามารถในการรับแรงเฉือนอัดของตัวอย่างขึ้นตรงกับค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นหลัก โดยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังคงให้

ค่าแรงเฉือนอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่ม ขณะที่กำลังรับแรงเฉือนอัดสูงสุดและต่ำสุด ได้แก่ 1.0FA80 และ 2.5FA100 มีค่าเท่ากับ 19.1 และ 2.9 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 6

จากลักษณะการออกแบบการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดนั้นเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างคอนกรีตธรรมดาและจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เห็นได้ชัดว่า การยึดเกาะกันระหว่างระบบซีเมนต์กับระบบจีโอโพลิเมอร์ไม่แข็งแรงเท่ากับระบบซีเมนต์และระบบซีเมนต์ร่วมกับระบบจีโอโพลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตเดิมกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เกิดเป็นผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะที่พื้นที่เชื่อมต่อกันได้ดี [6], [16]

ตารางที่ 6 กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงเฉือนอัด (เมกะปาสคาล)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.0FA100	2.6	3.2	3.5
1.5FA100	1.8	2.8	3.6
2.0FA100	1.2	2.5	3.2
2.5FA100	0.6	2.3	2.9
1.0FA80	2.7	10.8	19.1
1.5FA80	3.2	13.9	17.9
2.0FA80	3.6	14.4	15.6
2.5FA80	4.0	11.6	12.9



รูปที่ 7 การพัฒนากำลังรับแรงเฉือนอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

รูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพัฒนากำลังรับแรงเฉือนอัด แม้ว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 100 จะสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึงร้อยละ 91.4 และสูงที่สุด แต่เป็นเพียงกำลังรับแรงเฉือนอัดที่มีค่าเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มอร์ตาร์มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมร้อยละ 20 เช่นที่อายุ 7 วัน 1.0FA80 มีการพัฒนากำลังรับแรงเฉือนอัดเท่ากับร้อยละ 56.5 แต่ 1.0FA100 มีการพัฒนากำลังรับแรงเฉือนอัดเท่ากับร้อยละ 91.4

สรุปผล

จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายมีค่าลดลงเมื่อทำการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเพิ่มประมาณ 1.25 - 2.0 เท่า และเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างระบบซีเมนต์และระบบจีโอโพลิเมอร์ร่วมกับระบบซีเมนต์สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวได้สูงถึง 19.1 เมกะปาสคาล เมื่อใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานวัสดุซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตได้ เนื่องจากให้แรงยึดเกาะที่สูงและก่อตัวเร็ว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

References

- [1] 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
- [2] Chindaprasirt, 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] 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 and Design**. Vol. 53, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.018
- [4] Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Kovalchuk, G., Ordoñez, L. M., and Naranjo, M. C. (2007). Opc-Fly Ash Cementitious Systems: Study of Gel Binders Produced During Alkaline Hydration. **Journal of Materials Science**. Vol. 9, pp. 2958-2966. DOI: 10.1007/s10853-006-0585-7
- [5] Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensir, S., Sata, V., and Chindapasirt, P. (2014). Effects of NaOH Concentrations on Physical and Electrical Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Paste. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 45, pp. 9-14. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.012
- [6] 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
- [7] Songpiriyakij, S., Pulngern, T., Pungpremrakul, P., and Jaturapitakkul, C. (2011). Anchorage of Steel Bars in Concrete by Geopolymer Paste. **Materials and Design**. Vol. 32, Issue 5, pp. 3021-3028. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.01.048
- [8] Thumrongvut, J., Seangathith, S., and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30 (In Thai)
- [9] ASTM C191-13. (2013). **Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.01. Philadelphia
- [10] 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. Philadelphia
- [11] ACI 211.1-91. (1991). **Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete**. American Concrete Institute
- [12] 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
- [13] Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridtirud, C., Chindapasirt P., and Hatanaka, S. (2015). High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement for use as Repair Material. **Construction and Building Materials**. Vol. 98, pp. 482-428. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.139
- [14] ASTM C882. (2005). **Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used with Concrete by Slant Shear**. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia

- [15] Phoo-ngernkham, T., Chindapasirt, P., Sata, V., Pangdaeng, S., and Sinsiri, T. (2015). Properteis of High Calcium Fly Ash Geopolymer Pastes Containing Portland Cement as Additive. **International Journal of Minerals, metallurgy and Materials**. Vol. 20, No. 2, pp. 214-220. DOI: 10.1007/s12613-013-0715-6
- [16] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Li, L. Y., Damrongwiriyanupap, N., and Chindapasirt, P. (2019). Adhesion Characterization of Portland Cement Concrete and Alkali-Activated Binders Under Different Types of Calcium Promoters. **Advances in Cement Research**. Vol. 31, Issue 2, pp. 69-79. DOI: 10.1680/jadcr.17.00122