



A STUDY OF COMPRESSIVE STRENGTH AND SULFURIC ACID AND MAGNESIUM SULFATE RESISTANCES OF GEOPOLYMER MORTAR MADE FROM LOW CALCIUM FLY ASH BLENDED WITH HIGH CALCIUM FLY ASH

การศึกษากำลังอัด และการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง

กันติยา ไสธรชัยวิทย์¹ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² เทียง ชิวะเกตุ³ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁴

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: August 30, 2018

Received Revised Form:

October 3, 2018

Accepted: October 10, 2018

ABSTRACT:

This research studied the compressive strength, sulfuric acid resistance and loss of compressive strength due to magnesium sulfate attack of geopolymer mortar made from low calcium fly ash blended with high calcium fly ash at the rates of 15%, 25%, and 35% by weight of binder. Liquid to binder ratio of 0.60 by weight and NaOH concentration of 8 Molar were used. The compressive strength of geopolymer mortar was determined at the ages of 7, 28, 90, and 180 days. Weight loss of geopolymer mortar due to 3% of sulfuric acid solution (pH=0.5) was determined. Loss of compressive strength due to 5% magnesium sulfate solution was also investigated. The result showed that the compressive strength of geopolymer mortar increased with the increasing of high calcium fly ash content. Weight loss of geopolymer mortar due to sulfuric acid attack and loss of compressive strength due to magnesium sulfate attack also increased when high calcium fly ash increase. Therefore, the optimum replacement of low calcium fly ash by high calcium fly ash was 25% by weight of binder.

**Corresponding Author,
Email address:
kantiya_beer@hotmail.com*

KEYWORDS: Fly Ash, Geopolymer, Magnesium Sulfate, Sulfuric

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัด และการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงเป็นวัสดุประสานในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อสารตั้งต้นเท่ากับ 0.60 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน ทดสอบร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากกรดซัลฟูริก ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ($\text{pH} = 0.5$) และทดสอบการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงมากขึ้น แต่ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกและการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมากขึ้น ดังนั้น ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์คือร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

คำสำคัญ: กรดซัลฟูริก, จีโอโพลิเมอร์, เถ้าถ่านหิน, แมกนีเซียมซัลเฟต

1. บทนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาประเทศทำให้ปริมาณสิ่งปลูกสร้างมากขึ้น ส่งผลต่อความต้องการปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่สำคัญในการผลิตคอนกรีตและมอร์ตาร์ โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องระเบิดภูเขาหินปูน นำมาผ่านกระบวนการบด เเผา และอื่นๆ ซึ่งการเผาใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศ ส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจก ดังนั้นเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ลง วัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้ได้แก่ เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash) [1] อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ยังคงเป็นวัสดุประสานหลักในการผลิตคอนกรีต เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีการนำวัสดุปอซโซลาน ในการทำวัสดุประสานชนิดใหม่ที่ไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่เรียกว่า “จีโอโพลิเมอร์”

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานทำจากวัสดุ ปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็น

องค์ประกอบหลัก เมื่อผสมสารที่มีองค์ประกอบดังกล่าวกับอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต และใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เกิดการก่อตัวเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึกและแข็งตัว และสามารถรับกำลังอัดได้ดี [2, 3] จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เป็นเทคโนโลยีใหม่ซึ่งยังมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างน้อย เนื่องจากอยู่ในช่วงการศึกษาและพัฒนา จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยวัสดุปอซโซลาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อลดการกัดกร่อนจากสารเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เพราะกรดซัลฟูริกพบมากที่สุดและเป็นกรดเข้มข้นส่วนมากพบตามท่อระบายน้ำคอนกรีตซึ่งมีแบคทีเรียเกาะเหนือระดับน้ำทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก่อให้เกิดกรดซัลฟูริกตามมา เมื่อโครงสร้างคอนกรีตสัมผัสกับกรดซัลฟูริกทำให้เกิดความเสียหาย ขณะที่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเข้าทำปฏิกิริยากับคอนกรีตโดยตรงก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้

ดังนั้นคอนกรีตและมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์จึงต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดและซัลเฟตได้ไม่ดี เนื่องจากปูนซีเมนต์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ซึ่งกรดซัลฟูริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้คอนกรีตหรือมอร์ตาร์อ่อนแอ [4]

จากปัญหาดังกล่าวจึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องมีการบ่มด้วยความร้อน ทำให้ได้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้สูงขึ้นและช่วยลดปัญหาการกำจัดเถ้าถ่านหินที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า และลดมลภาวะในบริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ต้องนำวัสดุเหล่านี้ไปกำจัด ทั้ง รวมทั้งได้วัสดุก่อสร้างใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและนำไปสู่การใช้งานจริงในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ (LFA) จากโรงไฟฟ้า จังหวัดระยอง และเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (HFA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นวัสดุประสานร่วมกัน ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.45 และ 2.26 ตามลำดับ และมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าเท่ากับร้อยละ 20.80 และ 28.70 ตามลำดับ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ (LFA) มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของซิลิกา (SiO₂), อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 60.2, 24.0 และ 4.8 ตามลำดับ และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 5.1 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [5] ส่วนเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (HFA) มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของซิลิกา (SiO₂),

อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 27.9, 14.4 และ 15.6 ตามลำดับ ซึ่งผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 57.9 โดยน้ำหนัก และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 27.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [5]

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 ซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เท่ากับ 2.69 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.55 และการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.56

สารละลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) โดยสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีอัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ต่อโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) เท่ากับ 2.22 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.642 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 8 โมลาร์

สารลดน้ำพิเศษประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [6] เพื่อควบคุมการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ

Chemical Composition (%)	LFA	HFA
Silicon dioxide (SiO ₂)	60.2	27.9
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	24.0	14.4
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	4.8	15.6
Calcium oxide (CaO)	2.6	27.9
Magnesium oxide (MgO)	0.6	2.2
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.6	1.9
Potassium oxide (K ₂ O)	1.7	2.8
Sulfur trioxide (SO ₃)	0.4	7.1
Loss on ignition (LOI)	5.1	0.2

ตารางที่ 2 สมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

Properties	Result	Unit
Sodium oxide (Na ₂ O)	16.22	% (w/w)
Silicon dioxide (SiO ₂)	34.88	% (w/w)
Mole ratio (Na ₂ O : SiO ₂)	1:2.22	-
Specific gravity (At 20)	1.642	-

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง โดยนำเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในอัตราส่วน 85:15, 75:25 และ 65:35 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) เพื่อควบคุมการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 ถอดแบบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 24 ชั่วโมง หลังจากหล่อตัวอย่างเสร็จจากนั้นบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 3

2.3 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม.³ ทดสอบกำลังอัดของจีโอ

โพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน แต่ละอายุการทดสอบกำลังอัดได้จากค่าเฉลี่ยจำนวน 3 ตัวอย่าง

2.4 การทดสอบร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริก

การทดสอบร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม.³ เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้องครบอายุ 28 วัน ทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้น แล้วแช่ตัวอย่างลงในสารละลายกรดซัลฟูริก และชั่งน้ำหนักตัวอย่างเพื่อหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) เมื่อแช่ตัวอย่างเป็นเวลา 1, 3, 7, 14, 28, 42, 60, 90 และ 180 วัน

2.5 การทดสอบค่าการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

การทดสอบค่าการสูญเสียกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องครบ 28 วัน แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และทำการทดสอบกำลังอัดเพื่อหาค่าการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่แช่เป็นเวลา 90 และ 180 วัน เปรียบเทียบกำลังอัดของกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องที่อายุเท่ากัน

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Mix	Mix proportions (by weight)						Flow (%)
	LFA	HFA	Sand	NaOH	Na ₂ SiO ₃	SP	
100LFA	100	-	275	40	20	17	112
85LFA	85	15	275	40	20	13	113
75LFA	75	25	275	40	20	10	112
65LFA	65	35	275	40	20	9	110

หมายเหตุ 100LFA คือ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำที่บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

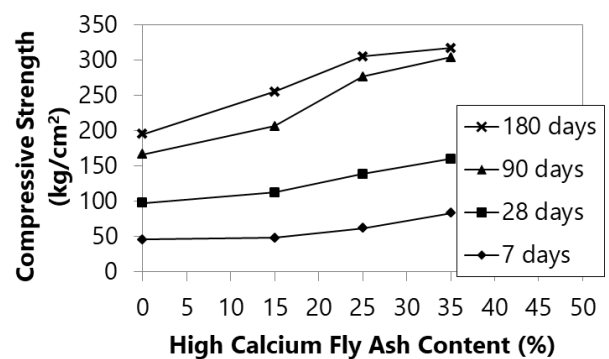
ตารางที่ 3 แสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมเพื่อควบคุมการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 100LFA มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 112 ซึ่งต้องใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 17 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อควบคุมการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ขณะที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 85LFA, 75LFA และ 65LFA ต้องการสารลดน้ำพิเศษเท่ากับร้อยละ 13, 10 และ 9 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเนื่องจากรูปร่างอนุภาคของเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีลักษณะกลมและผิวเรียบ ขณะที่อนุภาคของเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมีลักษณะกลมผิวขรุขระและมีความพรุนมากกว่าเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง [7, 8] ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในปริมาณมากจึงมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษลดลง [9] เพื่อให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงที่กำหนด

3.2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 65LFA ที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับ 83 และ 160 กก/ซม² ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 304 และ 317 กก/ซม² ที่อายุ 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ในขณะที่กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 75LFA ที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 62, 139, 277 และ 305 กก/ซม² ตามลำดับ และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 85LFA ที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 48, 113, 206 และ 255 กก/ซม² ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 100LFA พบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 65LFA, 75LFA และ 85LFA มีค่าสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 100LFA ทุกสัดส่วนผสมและสามารถแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องได้

เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในส่วนผสม ทำให้ปริมาณสารประกอบแคลเซียมในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณสารประกอบแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งสามารถแข็งตัวในอากาศได้ และกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น [10, 11]

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในอัตราส่วน 65:35 (65LFA) มีค่าเท่ากับ 83, 160, 304 และ 317 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดทุกช่วงอายุ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่เพิ่มขึ้น [12] เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงช่วยเพิ่มความเป็นอสัณฐานแก่ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [13] ที่ศึกษากำลังอัดและดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่เผาแบบ pulverized coal ผสมเถ้าถ่านหินที่เผาแบบ fluidized bed พบว่า กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง

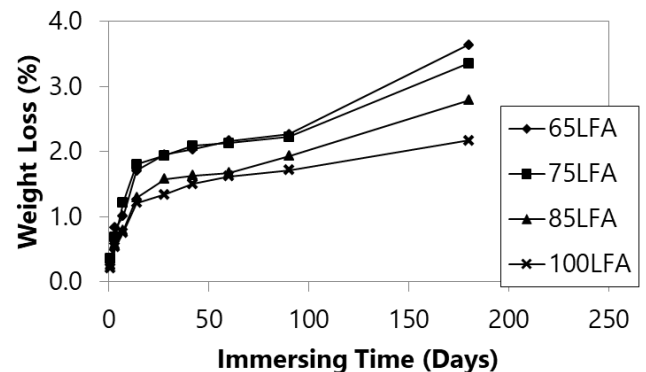
ตารางที่ 4 สมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

Mix	Compressive Strength (kg/cm ²)			
	7 days	28 days	90 days	180 days
100LFA	46	98	167	196
85LFA	48	113	206	255
75LFA	62	139	277	305
65LFA	83	160	304	317

3.3 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริก

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงแสดงดังรูปที่ 2 พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่อัตราส่วน 65:35, 75:25, 85:15 และ 100:0 ที่ระยะเวลาการแช่กรดซัลฟูริก 180 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 3.64, 3.36, 2.79 และ 2.17 ตามลำดับ เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมากขึ้นส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดซัลฟูริกและสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตที่ได้สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอะลูมิเนียมในเถ้าถ่านหินเกิดเป็นเอททริงไคต์ได้นอกจากนี้ปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และถูกทำลายด้วยกรดซัลฟูริกมากขึ้น เกิดสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตและซิลิกาเจล [14] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [15] ที่ศึกษากำลังอัดและการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินที่เผาด้วยอุณหภูมิต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณเถ้าถ่านหินที่เผาแบบ pulverized coal ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกลดลง เนื่องจากปริมาณสารประกอบแคลเซียมมากขึ้น ซึ่งแคลเซียมถูกทำลายได้ง่ายในสารละลายกรดซัลฟูริก

เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่อัตราส่วน 65:35, 75:25, 85:15 และ 100:0 ที่ระยะเวลาการแช่กรดซัลฟูริก 90 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 2.26, 2.22, 1.93 และ 1.71 ตามลำดับ ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ (OPC) มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ระยะเวลาการแช่กรดซัลฟูริก 90 วัน เท่ากับร้อยละ 66.9 [18] ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จึงสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ [12, 16, 17] เนื่องจากการใช้วัสดุปอซโซลานทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงส่งผลให้สารประกอบแคลเซียมในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต่ำลง จึงถูกทำลายด้วยกรดซัลฟูริกได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของจิรพงษ์ เอกพานิช [18] ที่ศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์ผสมวัสดุปอซโซลานซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ที่ได้จากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์

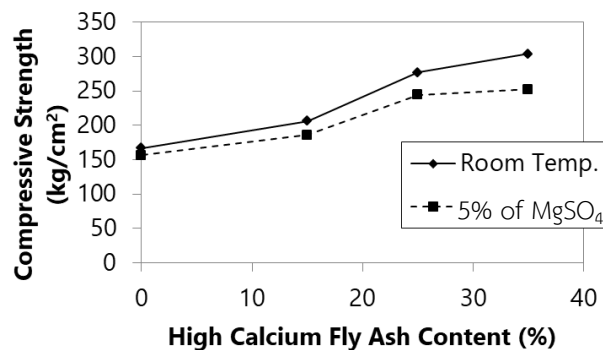


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และระยะเวลาการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

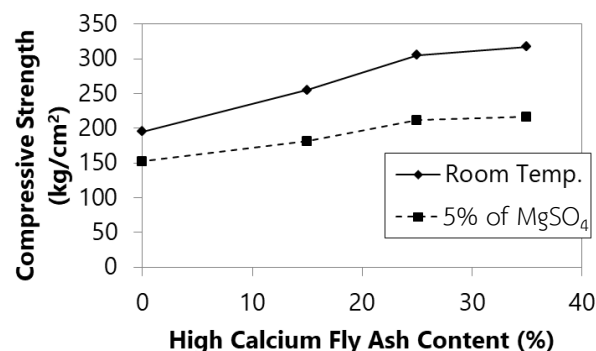
3.4 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 90 วัน และ 180 วัน แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตอายุ 90 วัน ต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์

มอร์ตาร์ที่ไม่ใช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เช่น กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร้อยละ 35, 25, 15 และ 0 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 304, 277, 206 และ 167 กก/ซม² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กลุ่มนี้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและทดสอบที่อายุเท่ากันทำให้กำลังอัดลดลงเหลือ 252, 244, 186 และ 157 กก/ซม² ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร้อยละ 35, 25, 15 และ 0 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 180 วัน มีค่ากำลังอัดที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 317, 305, 255 และ 196 กก/ซม² ตามลำดับ และหลังจากแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุเท่ากันทำให้กำลังอัดลดลงเป็น 216, 212, 181 และ 152 กก/ซม² ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในส่วนผสมทำให้ปริมาณสารประกอบแคลเซียมในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นซึ่งสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมทำให้เกิดคราบสีขาวบนผิวหน้าตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 5 เกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมแมกนีเซียมซิลิเกต และแมกนีเซียมซิลิเกต [14, 15] ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและอออนไฮดรอกไซด์จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทำให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม และยังเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความเสถียรน้อย [19] เนื่องจากสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยทำให้เกิดเป็นตะกอนเกาะที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์ โดยแมกนีเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นมีสมบัติในการยึดประสานต่ำ จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเกิดโพรงและรูพรุนขึ้น และส่งผลให้สูญเสียกำลังอัดมากขึ้น [20, 21, 22] ซึ่งจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 180 วัน กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่ใช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตค่อนข้างชัดเจน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 90 วัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 180 วัน



(5-a) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์บ่มอุณหภูมิห้องที่ไม่ใช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



(5-b) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 5 ผิวของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 การแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สามารถพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้ดีขึ้นได้ และสามารถแข็งตัวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 317 กก/ซม²

4.2 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในปริมาณน้อย สามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในปริมาณมาก

4.3 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในปริมาณน้อย สามารถลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในปริมาณมาก

4.4 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่เหมาะสมในแง่ของกำลังอัด และการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดที่สามารถใช้งานได้ และสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก

และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT-FTERO 6103) และขอขอบคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงไฟฟ้าฝ้าจังหวัดระยอง ที่เอื้อเฟื้อเถ้าถ่านหินเพื่อใช้ในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chondaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement Pozzolan and Concrete," 7th ed. Bangkok, Thailand: TCA, 2013.
- [2] J. Davidovits, "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology," Proceedings: 2nd International Conference on Geopolymer'99, Saint-Quentin, 1999, pp. 9-39.
- [3] X. Hua and J.S.J Van Deventer, "The Geopolymerisation of Natural Aluminosilicates," Proceedings: 2nd International Conference on Geopolymer'99, Saint-Quentin, 1999, pp. 43-63.
- [4] T. Bakharev, "Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack," Cem. Concr. Res., vol. 35, pp. 658-670, Jun. 2005.
- [5] American Society for Testing and Materials, ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2017.
- [6] American Society for Testing and Materials, ASTM C494: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, 2017.
- [7] N. Makul and B. Chatveera, "Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar: Influence of Fly Ash Sources and Sodium Silicate (Na_2SiO_3)/ Sodium Hydroxide (NaOH) Ratios," KMUTT Res. Dev., vol. 36, no. 1, pp. 99-125, Jan. 2013.
- [8] W. Krudam, W. Arckarapunyathorn and R. Sahamitmongkol, "Effect of High Volume Replacement

of Fine Aggregate with Bottom Ash on Flow, Setting Time, Compressive Strength and Shrinkage of Mortar,” *J. of TCA*, vol. 4, no. 2, pp. 1-13, Jul. 2016.

[9] A. Abdulmatin, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, “Effect of Types of Superplasticizer on Properties of Paste and Mortar Made with a Binder of Bottom Ash and Calcium Carbide Residue,” *J. of TCA*, vol. 3, no. 1, pp. 31-41, Jan. 2015.

[10] M. Eiamwijit, K. Pachana, S. Kaewpirom, U. Rattanasak, and P. Chindapasirt, “Comparative study on morphology of Ground Sub-Bituminous FBC Fly Ash Geopolymeric Material,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 26, pp. 1053-1057, Apr. 2015.

[11] P. Chindapasirt and U. Rattanasak, “Utilization of Blended Fluidized Bed Combustion (FBC) Fly Ash and Pulverized Coal Combustion (FCC) Fly Ash in Geopolymer,” *Waste Manage.*, vol. 30, pp. 667-672, Oct. 2010.

[12] U. Rattanasak, “Geopolymer,” 1st ed. Bangkok, Thailand: TCA, 2017.

[13] P. Chindapasirt, U. Rattanasak, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of Fly Ash Blends from Pulverized Coal and Fluidized Bed Combustions in Geopolymeric Materials,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, pp. 55-60, Sep. 2011.

[14] P. Chindapasirt, U. Rattanasak, and S. Taebuanhuad, “Resistance to Acid and Sulfate Solutions of Microwave-Assisted High Calcium Fly Ash Geopolymer,” *Mater. Struct.*, vol. 46, pp. 375-381, Jul. 2013.

[15] P. Chindapasirt, S. Jenjirapanya, and U. Rattanasak, “Characterizations of FBC/PCC Fly Ash Geopolymeric Composite,” *Constr. Build Mater.*, vol. 66, pp. 72-78, Jun. 2014.

[16] P. Chindapasirt and U. Rattanasak, “Improvement of Durability of Cement Pipe with High Calcium Fly Ash

Geopolymer Covering,” *Constr. Build Mater.*, vol. 112, pp. 956-961, Mar. 2016.

[17] V. Sata, A. Sathonsaowaphak, , and P. Chindapasirt, “Resistance of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar to Sulfate and Sulfuric Acid Attack,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, pp. 700-708, Feb. 2012.

[18] C. Eakpanich, “A Study of Sulfuric Acid Attack on Mortar Containing Pozzolan,” M.S. thesis, Dept. Civil Eng., King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2003.

[19] J. Skal, J. Marchand, and I. Odler, “Sulfate Attack on Concrete,” 1 st ed. New Fetter Lane, London: Spon Press, London, 2002.

[20] W. Chalee and K. Charoenprom, “Evaluation of Sulfate Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete,” *KMUTT Res. Dev.*, vol. 35, no. 2, pp. 157-171, Apr. 2012.

[21] T. Bakharev, “Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1233-1246, Jun. 2005.

[22] A. Srinidharan, SM. Rao, and VS. Gajarajan, “Effect of Sulfate Contamination on the Volume Change Behaviour of Bentonite,” *ASTM STP 1095*, pp. 60-68, 1990.