การทดสอบความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นภายใต้การกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DURABILITY OF GEOPOLYMER MORTAR USING QUARRY DUST AS FINE AGGREGATE UNDER SODIUM SULFATE AND MAGNESIUM SULFATE ATTACKS

***ศุภชัย สินถาวร*[1]*, *ณัฐณีกาณต์ ธรรมรัตน์*[1], *ศรัญญู เลิศเกียรติกุล*[1], *ภัทรพล ไพจิตรวิจารณ์*[2]**

***Suppachai Sinthaworn*[1]*, *Nathaneegan Thammarat*[1], *Saranyu Loedkiadtikul*[1], *Pattarapon Paijitvijarn*[2]**

[1]*ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*

[1]*Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University.*

[2]*หน่วยวิจัยด้านนวัตกรรมที่ยั่งยืนในกรอบวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*

[2]*RU in Sustainable Innovation in Civil and Environmental Engineering, Srinakharinwirot University.*

**Corresponding author, e-mail: suppachai@g.swu.ac.th*

***Received:** 21 May 2020; **Revised:** 7 April 2022; **Accepted:** 29 April 2022*

บทคัดย่อ

ความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่อสภาพแวดล้อมที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟต ซึ่งมีส่วนผสมจากเถ้าถ่านหิน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารเชื่อมประสาน โดยใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่น และทำการควบคุมการไหลแผ่ร้อยละ 110±5 โดยการเติมน้ำ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 โดยน้ำหนัก ผลทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 427-514 กก./.ซม.^{2} ยกเว้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 ที่ใช้ NaOH ความเข้มข้น 10 โมลาร์ มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 270-275 กก./ซม.^{2} และในสภาวะที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต (Na_2SO_4 และ $MgSO_4$) ความเข้นข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วง 0-28 วัน ทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 34-145 กก./ซม.^{2} ยกเว้น 70FA[10M](S) ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดลดลง 4-11 กก./ซม.^{2} และในช่วง 28-56 วัน ทุกส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดลดลงอยู่ในช่วง 5-50 กก./ซม.^{2} ในส่วนของการสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 28 และ 56 วัน จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทุกส่วนผสมมีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม แต่ในส่วนของการทดสอบค่าระยะการซึมผ่านของน้ำที่อายุ 56 วัน จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทุกส่วนผสมมีค่าระยะการซึมผ่านของน้ำต่ำกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม จากผลการทดสอบทั้งหมด พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 65 และใช้ NaOH ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นมีการสูญเสียกำลังอัดน้อยและมีความทึบน้ำสูง มีศักยภาพสามารถนำไปพัฒนาเป็นส่วนผสมที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟต

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์ หินฝุ่น ความทนทาน โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

Abstract

Durability of controlled flow geopolymer (ranged 110 ± 5% by adding water) mortar which contains fly-ash, sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) as a binder and use quarry dust as fine aggregate were compared to the control conventional cement mortar (W/C=0.4). From the results, the compressive strength of geopolymer mortars at the age of 28 days were in the range of 427-514 ksc, while compressive strength of geopolymer mortars (70% fly-ash with 10M NaOH) were in the range of 270-275 ksc. In exposed to sulfate solutions (5% by weight of Na_2SO_4 or $MgSO_4$), compressive strength of all mixtures had increased by 34-145 ksc until 28 days but the compressive strength of geopolymer mortar 70FA[10M](S) (70% fly-ash and 10M NaOH with sand,) had reduced by 4-11 ksc. Between 28 and 56 days in sulfate solution, compressive strength of all mixtures had decreased roughly 5-50 ksc. and all of geopolymer mortar loss compressive strength more than the control mortar. However, all geopolymer mortars show lower water penetration depth than that of the control mortar. This work found out that the geopolymer mortar 65FA[10M](D) (65% fly-ash and 10M NaOH with quarry dust) can be developed as a durable mixture which obtains low water penetration depth and slight compressive strength loss in sulfate environment.

Keywords: Geopolymer, Quarry Dust, Durability, Sodium Sulfate, Magnesium Sulfate

บทนำ

ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้าง ผลิตจากการเผาหินปูนและดินดาน ซึ่งมีสารประกอบซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์ เป็นหลัก อุณหภูมิในการเผาซีเมนต์อยู่ในช่วง 1,400-1,600 องศาเซลเซียส การผลิตใช้พลังงานและทรัพยากรธรรมชาติสูง ตั้งแต่การ ระเบิดภูเขา การย่อยหิน การลำเลียง การเผาวัสดุ รวมไปถึงการบดละเอียดเม็ดปูน เป็นที่ทราบกันว่าทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นการใช้วัสดุประสานมาทดแทนคอนกรีต เช่น จีโอโพลีเมอร์ ซึ่งอาจใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเช่น เถ้าถ่านหิน และหินฝุ่นร่วมด้วย เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ สำหรับวัสดุทดแทนที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

จีโอโพลีเมอร์ เป็นวัสดุยึดประสานที่ใช้วัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกา อะลูมินา ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและด่างแก่ เป็นสารตั้งต้น โดยการชะออกมาจากผิวอนุภาคสารปอซโซลานด้วยสารละลายซิลิเกตและสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูง อาจทำได้ในอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชั่น ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ เป็นสารประกอบที่ก่อตัวและรับแรงอัดได้ดี [1] สามารถใช้ผสมกับมวลรวมเพื่อให้ได้ลักษณะเหมือนกับคอนกรีต หรือ มอร์ต้าร์ได้

เถ้าถ่านหินแหล่งหลักของไทย ได้แก่แหล่งโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เถ้าถ่านหินได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ หรือ ซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่มีปริมาณของ $Si0_2$ + AL_2O_3 + Fe_2O_3 ตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และปริมาณ CaO สูง โดยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานชนิดหนึ่งตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 [2] ซึ่งมีหลากหลายงานวิจัยได้นำเถ้าลอยแม่เมาะเพื่อใช้ผสมทำจีโอโพลีเมอร์ [1-5]

หินฝุ่นที่เป็นผลพลอยได้จากจากอุตสาหกรรมการโม่หิน และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมได้น้อย ทำให้เกิดปัญหาในด้านการนำไปกำจัดทิ้ง โดยอนุภาคของหินฝุ่นมีขนาดตั้งแต่เท่า ๆ กับทราย และฝุ่นละเอียดที่มีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 ไมโครเมตร จึงก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อทางเดินหายใจ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้หินฝุ่นนำมาแทนที่ทรายได้ เนื่องจาก

คุณสมบัติของหินฝุ่นมีความใกล้เคียงกับทรายหยาบ เช่น ขนาดส่วนคละ ความถ่วงจำเพาะ ปริมาณความชื้น และหน่วยน้ำหนัก [6-7] ทั้งนี้ คุณสมบัติการยุบตัวของคอนกรีตสด กำลังรับแรงอัดและระยะการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตภายใต้แรงดัน โดยวัสดุประสานของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมเถ้าลอย และใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียด พบว่า การเพิ่มปริมาณของหินฝุ่นในคอนกรีตมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดเล็กน้อย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณฝุ่นจากหินฝุ่นในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้ระยะการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลง [8] และการเพิ่มขึ้นของฝุ่นจากหินฝุ่นในจีโอโพลิเมอร์จะทำให้ความสามารถในการทำงานที่ลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณฝุ่นร้อยละ 7 ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิมอร์ที่มีฝุ่นละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ร้อยละ 1 ถึง 11 [5] ดังนั้นการทดแทนทรายแม่น้ำด้วยหินฝุ่นในจีโอโพลิเมอร์อาจทำให้คุณสมบัติด้านความทนทานดีขึ้นหากผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสม

ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) เช่น ในน้ำทะเล น้ำกร่อยในบริเวณริมทะเลหรือในดินทั่วไป ในน้ำเสีย โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ปัจจุบันปูนซีเมนต์ประเภททนน้ำเค็ม ดินเค็ม หรือปูนซีเมนต์ผสมสารปอซโซลาน เป็นทางเลือกที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ [9-10] หากจะส่งเสริมการใช้จีโอโพลิเมอร์เพื่อทดแทนวัสดุจากปูนซีเมนต์ จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตด้วย

สำหรับการพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้ทดแทนงานคอนกรีตที่ใช้สำหรับการซ่อมแซม ในปี พ.ศ.2554 ปะริด และคณะ [3-4] ได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ในรูปของมอร์ต้าร์โดยใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นเพื่อเป็นวัสดุซ่อมแซม ใช้เถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 65 และ 70 โดยน้ำหนัก โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความเข้มข้นของโซเดียม ไฮดรอกไซด์ 10 และ 15 โมลาร์ และใช้โซเดียมซิลิเกต 2 ชนิดที่มีอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2.38 และ 3.2 ใช้อัตราส่วนหินฝุ่นต่อเถ้าถอยเท่ากับ 2 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ทำการเพิ่มน้ำเพื่อให้ได้การไหลร้อยละ 110±5 พบว่า ส่วนผสมที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 65 โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10M และ 15M โซเดียมซิลิเกตที่มีอัตราส่วนโมล 2.38 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 M โซเดียมซิลิเกตที่มีอัตราส่วน โมล 2.38 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก โดยทั้งสามส่วนผสมมีปริมาณน้ำร้อยละ 3.5 ถึง 6 จะมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 มีค่าการก่อตัวเร็วสุดที่ 130 นาที และช้าสุดที่ 395 นาที มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 300 ถึง 450 กก./ตร.ซม ที่อายุ 28 วัน และการใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นแทนทรายทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นในช่วงต้น จากนั้นเมื่อนำไปทดสอบการหดตัว พบว่าค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.016 ถึง 0.074 ซึ่งสามารถนำไปศึกษาและพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซมได้ทั้ง 3 ส่วนผสม

สำหรับส่วนผสมที่มีศักยภาพในการพัฒนาจากงานวิจัยของปะริด เรามานะ และคณะ [3] และ พชร ทองเผือก และคณะ [4] ยังขาดส่วนของการทดสอบระยะการซึมผ่านของน้ำ ความทนทานหากแช่ในกรดซัลเฟต ดังนั้นงานวิจัยจึงเป็นงานวิจัยที่ต่อเนื่องจากงานวิจัยเดิม [3-5] เพื่อศึกษาด้านความทนทานของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังและความยืดหดตัวได้ตามมาตรฐานวัสดุซ่อมแล้ว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาความทนทานของจีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (ซึ่งเป็นส่วนผสมได้แก่ น้ำ เถ้าถ่านหิน โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต) และใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียด จากการกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต (ความเข้มข้นร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C1012 [11]) เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับซ่อมแซมในสภาวะแวดล้อมที่มี

ซัลเฟตรุนแรง

วิธีดำเนินการวิจัย

จีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ในการวิจัยนี้ ใช้วัสดุประสาน ได้แก่ เถ้าถ่านหิน อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ใช้มวลรวมละเอียด ได้แก่ หินฝุ่น ทราย โดยกำหนดขนาดคละในมาตรฐาน ASTM C 33 [12] ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตความเข้มข้น 2.30 [3] โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 การผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์นั้นมีวิธีการผสม 2 วิธี คือ การผสมแบบรวม และการผสมแบบแยก [1] ซึ่งในงานนี้เลือกใช้การผสมแบบแยกด้วยมือ โดยการเตรียมตัวอย่างนี้อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการผสมใช้อุปกรณ์ที่เป็นพลาสติก เริ่มการเตรียมตัวอย่างโดยนำเถ้าถ่านหิน กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เตรียมก่อนการผสมอย่างน้อย 24 ชั่วโมง) มาผสมกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต กวนผสมอีก 3 นาที และเติมทรายหรือหินฝุ่น (ในอัตราส่วนทรายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 2:1) แล้วกวนผสมอีก 2 นาที จากนั้นทดสอบความสามารถในการทำงานได้ด้วยการวัดค่าการไหลแผ่ โดยส่วนผสมถูกออกแบบให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 (ทั้งนี้มีการเติมน้ำใน 70FA [10M] จำนวนร้อยละ 10 และ 70FA [15M] จำนวนร้อยละ 6 ของสารเชื่อมประสานทั้งหมดเพื่อให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงที่กำหนด) จากนั้นหล่อมอร์ต้าร์ด้วยแบบหล่อ ขนาด 5x5x5 ซม. กระทุ้งให้แน่นตามมาตรฐาน ASTM C 109 [13] และห่อด้วยแผ่นฟิล์มไวนิลเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้จีโอโพลิเมอร์แข็งตัว แกะออกจากแบบ จากนั้นนำไปบ่มอากาศรวมเป็นเวลา 3 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ และการทดสอบนี้ใช้มอร์ต้ามาตรฐานจากซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วน 1:2 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 (ใช้สัญลักษณ์ 100C (S))ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในงานคอนกรีตทนสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟต

จากนั้นทำการทดสอบ ได้แก่ (1) กำลังรับแรงอัด (ASTM C 109) ที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน (2) ศึกษากำลังรับแรงอัดภายใต้การกระทำของสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุการแช่ 28 และ 56 วัน หลังจากที่มอร์ต้ามีกำลังมากกว่า 200 ก.ก./ซ.ม.^{2} (3) ศึกษาการสูญเสียกำลังอัดภายใต้การกระทำของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุการแช่ 28 และ 56 วัน (4) ศึกษาระยะการซึมผ่านของน้ำในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ตามมาตรฐานเยอรมัน (DIN 1048: Part 5) [14] ที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยทุกการทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ผลการวิจัย

ผลการทดสอบส่วนที่ 1 เป็นผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ขณะที่ผลการทดสอบส่วนที่ 2 เป็นผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ควบคุมการไหลแผ่ และผลการวิจัยส่วนที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 และเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 3.14 และ 2.27 ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะ และร้อยละการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด ของทรายและหินฝุ่น 2.53 (0.92%) และ2.68 (1.56%) และมวลรวมละเอียดทั้งสองถูกจัดค่าค่า F.M. โมดูลัสเท่ากับ 2.79 จากคุณสมบัติดังกล่าวพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมสองชนิดนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นได้ว่าร้อยละการดูดซึมของมวลรวมละเอียดจากทราย และมวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นนั้นมีค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด การควบคุมวัสดุทั้งหมดให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการดูดซึมของวัสดุที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัย [6-8] ที่พบว่าสามารถ

นำหินฝุ่นมาทดแทนทรายได้

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ควบคุมการไหลแผ่ตามมาตราฐาน

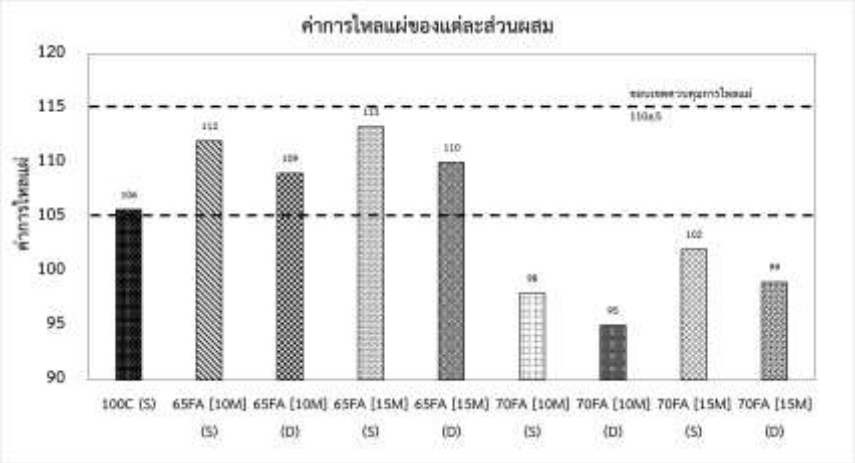
ส่วนผสม	ร้อยละเถ้าถ่านหิน	(NaOH) (%)		Na_2SiO_3 (2.30) (%)	อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าถ่านหิน	น้ำ/ของแข็ง	มวรวมละเอียด
		10M	15M				
65FA [10M] (S)	65	17.5	-	17.5	0.334	0.277	ทราย (S)
5FA [10M] (D)	65	17.5	-	17.5	0.334	0.277	หินฝุ่น (D)
65FA [15M] (S)	65	-	17.5	17.5	0.302	0.244	ทราย (S)
65FA [15M] (D)	65	-	17.5	17.5	0.302	0.244	หินฝุ่น (D)
70FA [10M] (S)	70	15	-	15	0.407	0.349	ทราย (S)
70FA [10M] (D)	70	15	-	15	0.407	0.349	หินฝุ่น (D)
70FA [15M] (S)	70	-	15	15	0.323	0.271	ทราย (S)
70FA [15M] (D)	70	-	15	15	0.323	0.271	หินฝุ่น (D)

หมายเหตุ
ตัวเลขหน้า FA คือ ร้อยละของเถ้าถ่านหิน
ตัวเลขหน้า M คือความเข้มข้นของ NaOH
ในวงเล็บ คือ ประเภทของมวลรวมละเอียด S=ทราย D=หินฝุ่น

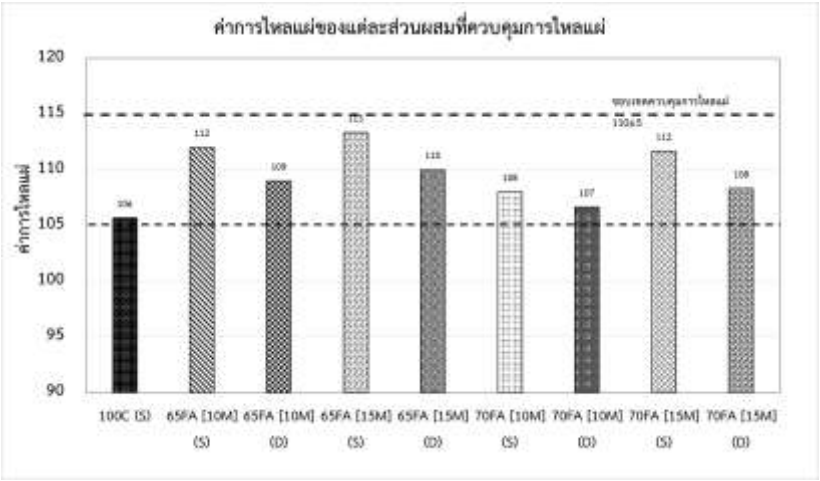
ผลการทดสอบการไหลแผ่ ภาพที่ 1 แสดงค่าการไหลแผ่ของแต่ละส่วนผสม จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10M ทำให้มีค่าการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่ำกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้นข้น 15M และ การใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นเป็นส่วนผสมนั้นทำให้มีค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่ำกว่าการใช้มวลรวมละเอียดจากทราย อย่างไรก็ตามทุกส่วนผสมที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 65 ยังมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5

ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 นี้มีการใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นจากส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 65 ทำให้ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์ มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 นั้นมีค่าต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 65 ค่าการไหลแผ่น้อยกว่าช่วงร้อยละ110±5 ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มเถ้าลอยในส่วนผสม มีผลโดยตรงให้อัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อของแข็งลดลง จึงทำให้การทำงานนั้นยากขึ้น หลังจากนั้นได้ทำการปรับแก้ค่าการไหลโดยการเติมน้ำในส่วนผสม (ดังแสดงค่าน้ำต่อของแข็ง ในตารางที่ 1) ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 ทั้งหมด เพื่อทำค่าการไหลให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 ดังแสดงการไหลแผ่ในภาพที่ 2 และเป็นส่วนผสมที่เตรียมสำหรับหาค่ากำลังและคุณสมบัติอื่นต่อไป

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ควบคุมการไหลแผ่แสดงในภาพที่ 3 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 427-514 กก./ซม.^{2} ยกเว้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 ที่ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ 70FA[10M] ที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 270-275 กก./ซม.^{2} ซึ่งเป็นผลจากการเติมน้ำมาก เพื่อให้ได้ค่าการไหลอยู่ในช่วงที่ควบคุม

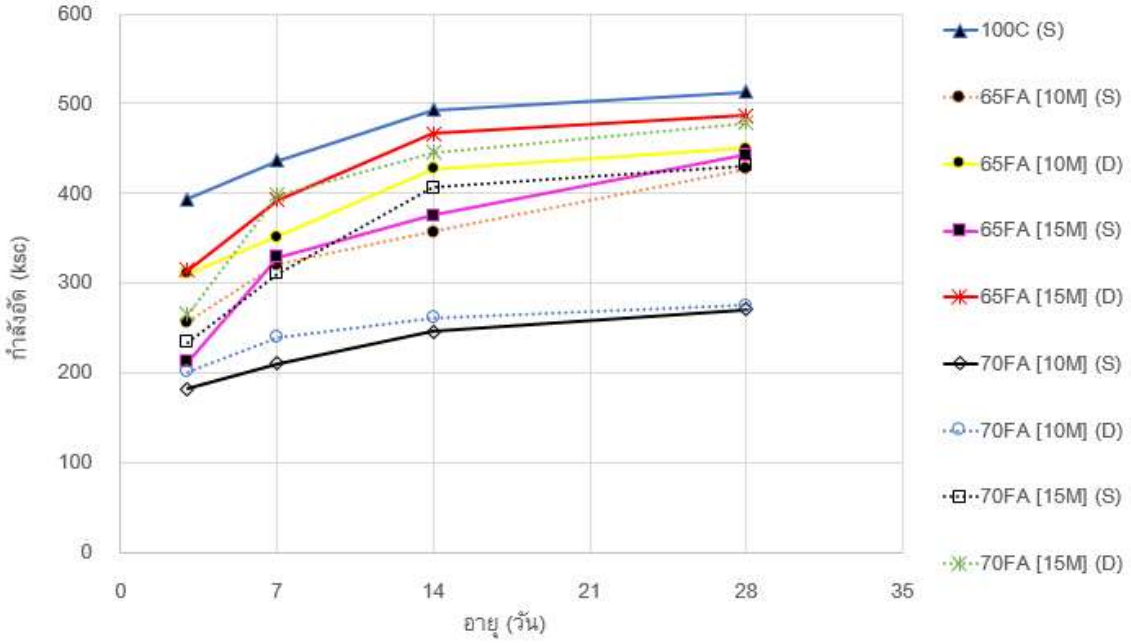


ภาพที่ 1 ค่าการไหลแผ่ของแต่ละส่วนผสม

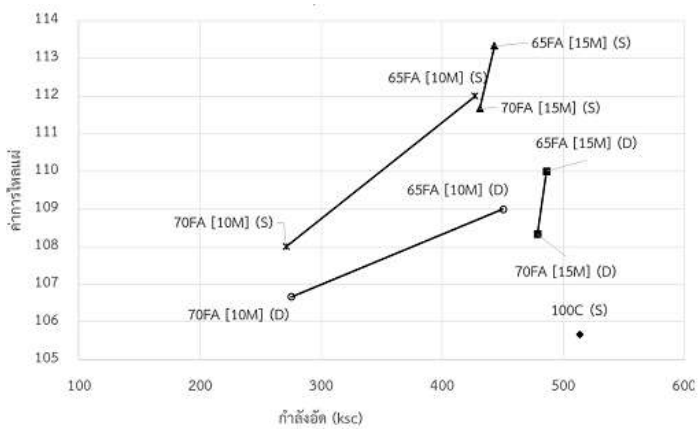


ภาพที่ 2 ค่าการไหลแผ่ของแต่ละส่วนผสม และหลังการเติมน้ำในส่วนของเถ้าลอยร้อยละ 70

ภาพที่ 4 ถึง ภาพที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบผลของส่วนผสมในชนิดของวัสดุผสม จากภาพที่ 4 พบว่าการเพิ่มเถ้าถ่านหินจากร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น เป็นร้อยละ 70 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงทุกอัตราส่วน ทั้งนี้เพราะการเติมน้ำเพิ่มที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้นเพื่อควบคุมการไหลแผ่ ซึ่งน้ำที่เติมเพิ่มเข้าไปทำให้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลง จึงทำให้ความสามารถในการชะซิลิก้าและอลูมินาออกจากเถ้าถ่านหินได้น้อยลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [1] ขณะที่ภาพที่ 5 เป็น พบว่าที่การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมลาร์ เป็น 15 โมลาร์ ส่งผลให้ค่าการไหลและกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นทุกอัตราส่วน และภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน การใช้หินฝุ่นให้กำลังรับแรงอัดมากกว่า การใช้มวลรวมละเอียดจากทรายในทุกส่วนผสม อาจเป็นเพราะหินฝุ่นมีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งจัดได้ว่า เป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น ส่งผลต่อกำลังแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ให้สูงขึ้น



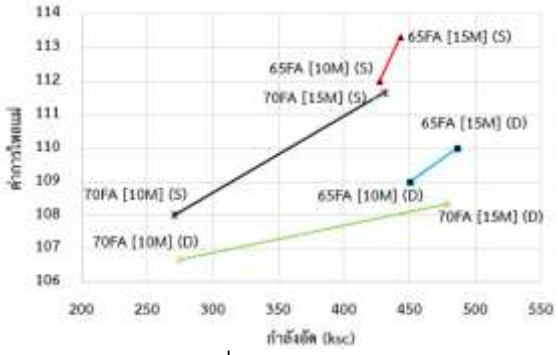
ภาพที่ 3 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ควบคุมการไหลแผ่



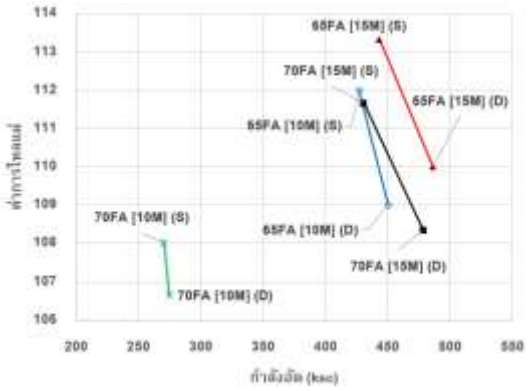
ภาพที่ 4 เปรียบเทียบร้อยละเถ้าถ่านหินร้อยละ 65 และ 70 โดยค่าการไหลและกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ หลังจากชิ้นตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดเกิน 200 กก./ซม.^{2} แล้วนำมาแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากภาพที่ 7 และ 8 เป็นการเปรียบเทียบการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตตามลำดับ พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ในช่วงระยะเวลาแช่ 0-28 วัน ทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 34-145 กก./ซม.^{2} ยกเว้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 ที่ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์และใช้มวลรวมละเอียดจากทราย ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดลดลง 4-11 กก./ซม.^{2} และในช่วงระยะเวลาการแช่ 28 - 56 วัน ทุกส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดลดลงอยู่ในช่วง 5-50 กก./ซม.^{2} โดยภาพรวมจะเห็นว่าส่วนผสมที่มีกำลังตั้งต้นมากกว่าจะมีกำลังที่เหลืออยู่หลังจากการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

มากกว่า



ภาพที่ 5



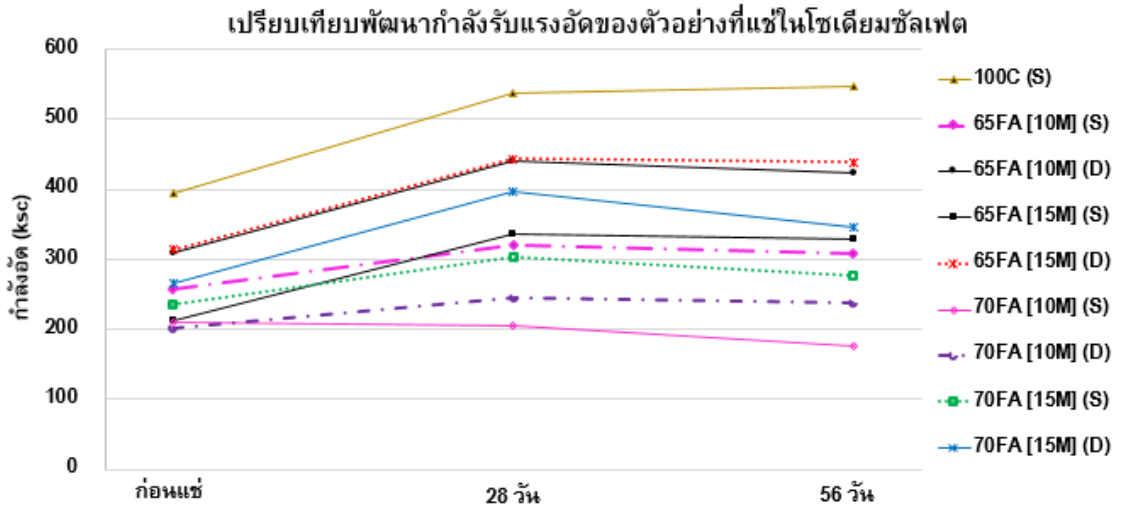
ภาพที่ 6

ภาพที่ 5 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ NaOH 10M และ15M โดยค่าการไหลและกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน และ **ภาพที่ 6** เปรียบเทียบชนิดมวลรวมหินฝุ่น(D) และทราย(S) โดยค่าการไหลและกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

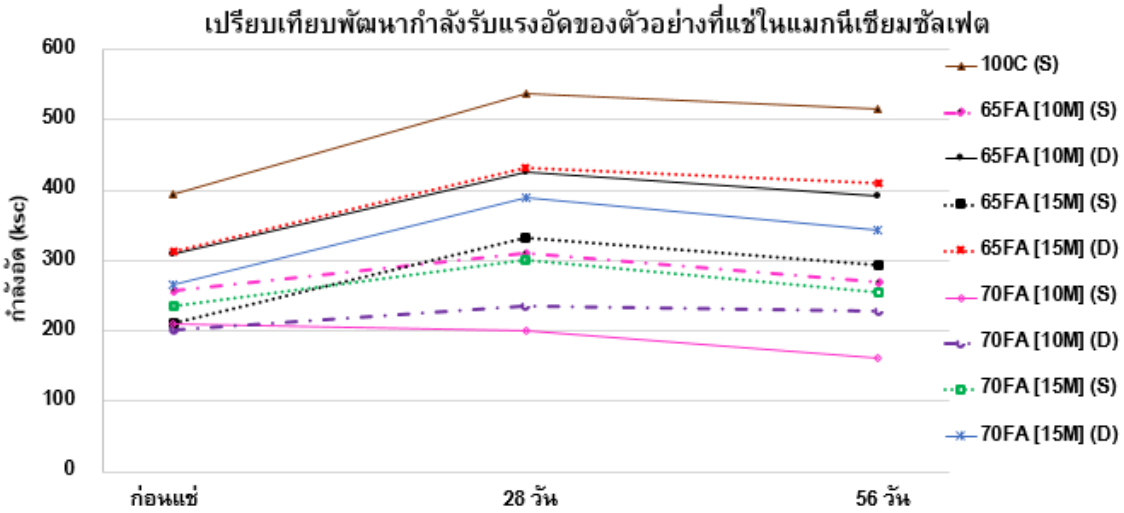
ตารางที่ 2 เป็นค่ากำลังอัดของตัวอย่างบ่มปกติในอากาศ และที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต หลังจากตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าหรือเท่ากับ 200 กก./ตร.ซม. (เท่ากับ 3 วัน) ตัวอย่างจะถูกแช่เป็นเวลา 28 และ 56 วัน (อายุตัวอย่างเท่ากับ 31 และ 59 วัน ตามลำดับ) และกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องที่อายุ 28 และ 56 วันเท่ากัน

ผลการวิเคราะห์การสูญเสียกำลังหลังจากแช่สารละลายซัลเฟต ผลของชนิดวัสดุประสานและร้อยละเถ้าถ่านหินต่อร้อยละกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเทียบกับกลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน แสดงในภาพที่ 7 และที่อายุ 56 วัน แสดงในภาพที่ 8 ซึ่งแสดงว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทุกส่วนผสมมีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม และในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น จะมีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ากว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น อาจเป็นผลมาจากปริมาณของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้โซเดียมไอออนจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์มากขึ้น

จากตารางที่ 2 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น จะมีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ากว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันการแช่ในกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณซิลิกามากขึ้น ส่งผลให้แมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับซิลิกา ทำให้เกิดรูพรุนภายในจีโอโพลิเมอร์ กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่สัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงต่ำลง



ภาพที่ 7 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5



ภาพที่ 8 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5

หากมองในมุมของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะพบว่า ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ จะมีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ในทุกการทดสอบ และหากมองในมุมของมวลรวมละเอียดจะพบว่า การใช้หินฝุ่นให้ผลการสูญเสียกำลังต่ำกว่าการใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวม

ผลการสูญเสียกำลังอัดเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 56 วัน พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่าแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้มาจากวัสดุปอสโซลานที่มีสารประกอบซิลิกาและอลูมิน่าสูง และยังมีสารประกอบอื่น ๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไอออนของแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุปอสโซลานจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทำให้เกิดเป็นสารประกอบยิปซั่ม โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียพันธะ (Bonding Loss) ซึ่งเป็นสาเหตุให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเกิดการสูญเสียกำลังอัด แต่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมี

การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นค่อนข้างชัดเจน โดยทุกตัวอย่างมีคราบสีขาวก่อตัวออกมาจากผิวจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง Mg^{2+} (จากสารละลาย $MgSO_4$) กับ OH^- (จากสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการผสม) เกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ชัดที่บริเวณผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ นอกจากนี้อาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมไอออนกับซิลิกา ได้เป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต โดยการเกิดสารประกอบทั้งสองทำให้เกิดรูพรุนและช่องว่างอากาศ อาจมีผลทำให้จีโอโพลิเมอร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการสูญเสียกำลังอัดและมีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตอีกด้วย

ตารางที่ 2 ค่ากำลังอัดของตัวอย่างบ่มปกติ และที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

ชื่อส่วนผสม	ค่ากำลังอัด (กก./ตร.ซม.) *[ค่าร้อยละเปรียบเทียบกับการบ่มปกติ]					
	ตัวอย่างที่บ่มปกติในอากาศที่อุณหภูมิห้อง		ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต		ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	
	28 วัน	56 วัน	28 วัน	56 วัน	28 วัน	56 วัน
100C (S)	517	525	537 [104]	547 [104]	538 [104]	514 [98]
65FA [10M] (S)	425	430	321 [76]	309 [72]	310 [73]	271 [63]
65FA [10M] (D)	455	481	441 [97]	423 [88]	426 [94]	393 [82]
65FA [15M] (S)	473	477	336 [71]	328 [69]	332 [70]	293 [61]
65FA [15M] (D)	496	511	444 [89]	439 [86]	431 [87]	409 [80]
70FA [10M] (S)	277	279	206 [74]	177 [64]	200 [72]	162 [58]
70FA [10M] (D)	282	289	246 [87]	238 [82]	236 [84]	228 [79]
70FA [15M] (S)	444	451	303 [68]	277 [61]	302 [68]	255 [57]
70FA [15M] (D)	480	483	396 [82]	345 [72]	388 [81]	343 [71]

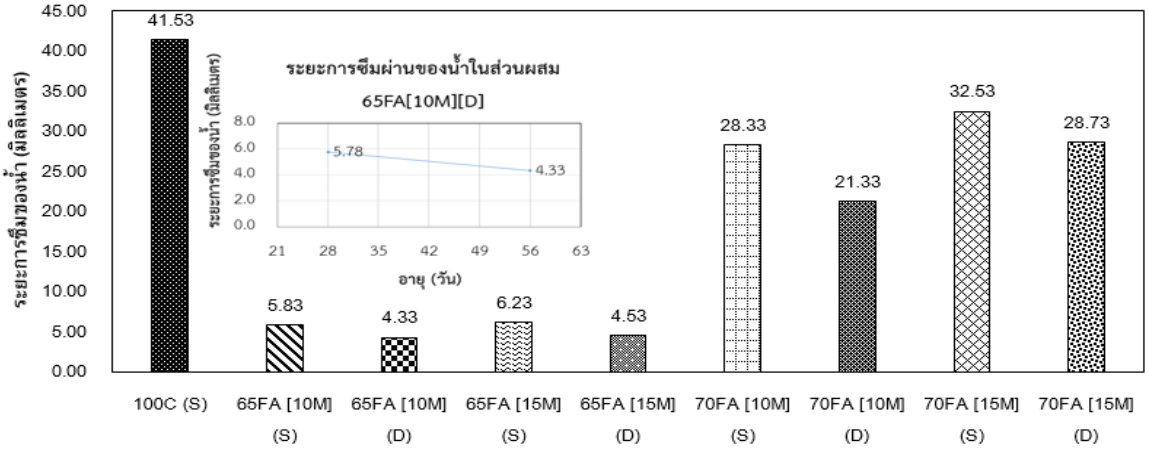
*ร้อยละเปรียบเทียบกับตัวอย่างบ่มปกติในอากาศที่อุณหภูมิห้องที่อายุเดียวกัน

ก. ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ข. ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 9 จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (ซ้าย) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ขวา)

การทดสอบระยะการซึมผ่านของน้ำในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ภาพที่ 10 เป็น ระยะการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างที่บ่มอากาศของแต่ละส่วนผสม ที่อายุ 56 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีระยะการซึมผ่านของน้ำน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมทุกส่วนผสม อาจสรุปได้ว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความทึบน้ำสูง และพบว่าในส่วนผสมที่มีเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 (กรอบเส้นประ) จะมีค่าระยะการซึมผ่านของน้ำที่สูงมากกว่าส่วนผสมที่มีเถ้าถ่านหิน

ร้อยละ 65 (กรอบเส้นทึบ) อย่างเห็นได้ชัด และในส่วนผสมที่เพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมลาร์ เป็น 15 โมลาร์ ส่งผลให้ระยะการซึมผ่านของน้ำเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย แต่ในส่วนผสมที่เปลี่ยนมวลรวมละเอียดจากทรายเป็นหินฝุ่น ส่งผลให้ระยะการซึมผ่านของน้ำลดลง ทั้งนี้ในภาพที่ 10 แสดงระยะการซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 และ 56 วันของส่วนผสม 65FA[10M][D] ซึ่งพบว่ามีความทึบน้ำ แสดงถึงโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการพัฒนาโครงสร้างภายในจนทำให้มีการพัฒนากำลังอัดและความทึบน้ำจากอายุต้นไปถึงอายุ 56 วัน



ภาพที่ 10 ระยะการซึมผ่านของน้ำของส่วนผสม และ ระยะการซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสม 65FA[10M][D] ที่อายุ 28 และ 56 วัน

สรุปและอภิปรายผล

มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นมีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียดจากทรายแม่น้ำ อย่างไรก็ตามหินฝุ่นมีค่าการดูดซึมมากกว่าทรายแม่น้ำ ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำในการออกแบบส่วนผสมและค่าร้อยละการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ การเพิ่มร้อยละของเถ้าถ่านหินจากร้อยละ 65 เป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น หรือการใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นแทนทรายแม่น้ำ การทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง แต่การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมลาร์ เป็น 15 โมลาร์ ทำให้ความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้น การเพิ่มร้อยละของเถ้าถ่านหินจากร้อยละ 65 เป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น ส่งผลให้โพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง จากการเติมน้ำเพิ่มเพื่อรักษาค่าการไหลแผ่ ในขณะที่การใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นแทนทรายแม่น้ำ หรือ การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมลาร์ เป็น 15 โมลาร์ ส่งผลให้โพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต มีค่ากำลังอัดที่เหลืออยู่มากกว่ากรณีแช่ในแมกนีเซียมซัลเฟตในทุกตัวอย่าง และพบว่าอัตราการลดลงของกำลังอัดหลังจากแช่สารละลายซัลเฟตแปรผกผันกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ขณะที่ค่าระยะการซึมผ่านของน้ำไม่ขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัด แต่ขึ้นอยู่กับอายุตัวอย่างโดยอายุมากขึ้นมีความทึบน้ำมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ และใช้มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่น มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยและมีความทึบน้ำสูง มีศักยภาพสามารถนำไปพัฒนาเป็นส่วนผสมที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟต

เอกสารอ้างอิง

[1] Rattanasak, U., and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, *22*(12), 1073-1078.

[2] ASTM C618-19. (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken.

[3] Raomana, P., Tongpaurg, P., Khukaew, P., and Sinthaworn, S. (2012). The Study of Properties of Geopolymer Mortar Incorporate with Quarry Dust as Fine Aggregate for Using as a Repair Material. In *Proceedings of the 17th National Convention on Civil Engineering (NCCE17)*. pp.1-8. Udon Thani, Thailand. (In Thai).

[4] Tongpaurg, P., Khukaew, P., and Raomana, P. (2011). *The Study of Properties of Geopolymer Mortar by Using Quarry Dust Fine Aggregate for Using as a New Repair Material*. Senior Project, B.Eng (Civil Engineering). Srinakharinwirot University. (In Thai).

[5] Kleebsakul, P., Artbumrung, S., and Leangkonkit, D. (2012). *Effect of Fine Content in Khao chong tian, Chonburi Stone Dust on Properties of Geopolymer Mortar*. Senior Project, B.Eng (Civil Engineering). Srinakharinwirot University. (In Thai).

[6] Sinthaworn, S., Koseekageepat, T., and Saengmanee, O. (2014). Investigation of Engineering Properties of Quarry Waste in Eastern Part of Thailand for Use as Fine Aggregate in Concrete. *Advanced Materials Research, 974,* 350-353.

[7] Sinthaworn, S., Koseekageepat, T., and Saengmanee, O. (2013). Some Engineering Properties of Quarry Waste for Used as Fine Aggregate in Mortar. In *Proceeding of 2012 Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (2012 HKICEAS)*. pp. 1-7. Hong Kong, China.

[8] Sinthaworn, S. (2017). Water Penetration Resistance of Fly Ash Concrete Incorporating with Quarry Wastes. *Materials Science Forum, 886,* 159-163.

[9] Merida, A., and Kharchi, F. (2015). Pozzolan Concrete Durability on Sulphate Attack. *Procedia Engineering, 114*, 832-837.

[10] Janotka, I., and KrajČi, L. (2008). Sulphate resistance and passivation ability of the mortar made from pozzolan cement with zeolite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *94*, 7-14.

[11] ASTM C1012/C1012M-12. (2012). *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*, ASTM International, West Conshohocken.

[12] ASTM C33/C33M-18. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International, West Conshohocken.

[13] ASTM C109/C109M-20a. (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International, West Conshohocken.

[14] DIN 1048. (1991). *Standard for determination of Permeability of Concrete*. German National Standard.