

กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีพีซีเอ็มเป็นวัสดุยึดเกาะ

ศตคุณ เดชพันธ์ เสริมศักดิ์ สุขเกษม ชุตานัก เดชพันธ์ ชัตติย ชมพวงศ์ สมใจ ยุบลชิต และ ธนากร ภูเงินขำ*

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สกลวรรณ ทานจิตสุวรรณ

สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5362 8964 อีเมล: tanakorn.ph@muti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.014

รับเมื่อ 1 กันยายน 2563 แก้ไขเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2563 ตอรับเมื่อ 1 ธันวาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 22 พฤศจิกายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีพีซีเอ็มเป็นวัสดุยึดเกาะระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต งานวิจัยนี้ใช้คอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดประลัยที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 25 เมกะปาสคาล และจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเอฟจีดีพีซีเอ็มร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และแปรผันปัจจัยของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีต สำหรับการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต คอนกรีตสดถูกเทลงแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $100 \times 100 \times 100$ มิลลิเมตร หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตถูกถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกกันน้ำและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ (25 ± 2 องศาเซลเซียส) จบครบ 28 วัน หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตถูกเจาะรูตรงกลางตัวอย่างคอนกรีตให้มีขนาดเท่ากับ 22 มิลลิเมตร และดำเนินการติดตั้งเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร และใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตถูกทดสอบที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน ผลการทดสอบพบว่า กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตที่มีการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ด้วยเอฟจีดีพีซีเอ็มมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ขณะที่ปริมาณของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นช่วยพัฒนา กำลังยึดเหนี่ยวได้ยกเว้นส่วนผสมของการแทนที่เอฟจีดีพีซีเอ็มร้อยละ 30 และกระตุ้นด้วยอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซิลิเกตจากเอฟจีดีพีซีเอ็มกับซิลิกาที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตส่งผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมพบว่า กำลังยึดเหนี่ยวที่มีการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีพีซีเอ็มมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีพีซีเอ็มสามารถพัฒนาเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างเหล็กเส้นและคอนกรีตได้

คำสำคัญ: กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีต อุปกรณ์ฝังยึดแบบใช้วัสดุยึดเกาะ จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เถ้าลอยแคลเซียมสูง เอฟจีดีพีซีเอ็ม

การอ้างอิงบทความ: ศตคุณ เดชพันธ์, เสริมศักดิ์ สุขเกษม, ชุตานัก เดชพันธ์, ชัตติย ชมพวงศ์, สมใจ ยุบลชิต, ธนากร ภูเงินขำ และ สกลวรรณ ทานจิตสุวรรณ, “กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีพีซีเอ็มเป็นวัสดุยึดเกาะ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 623–635, ก.ค.-ก.ย. 2565.



Bond Strength of Deformed Steel Bar in Concrete Using Fly Ash Geopolymer Mortar Containing FGD-Gypsum as Bonding Agent

Satakhun Detphan, Sermasak Sookasem, Chudapak Detphan, Khattiya Chompoovong, Somjai Yubonchit and Tanakorn Phoo-ngernkham*

Sustainable Construction Material Technology Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand
Sakonwan Hanjitsuwan

Program of Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 5362 8964, E-mail: tanakorn.ph@muti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.014

Received 1 September 2020; Revised 23 November 2020; Accepted 1 December 2020; Published online: 22 November 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article aims to develop the use of high-calcium Fly Ash (FA) Geopolymer Mortar (GPM) containing FGD-gypsum (FGD) for use as the bonding agent between steel bars and concrete. This research used concrete with 28-day compressive strength of 25 MPa, and geopolymer mortar made from FA containing FGD with the rates of 0, 10, 20 and 30 by weight of binder. The reaction degree of geopolymer material was activated by sodium silicate (NS) and 10 molar sodium hydroxide (NH) solutions with various NS/NH ratios of 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5. For the preparation of concrete specimens, the fresh concrete was cast into a $100 \times 100 \times 100$ mm³ cube mold. They were cured for a day and then demolded with immediately wrapped by a plastic sheet and kept in room temperature of $(25 \pm 2$ °C) until 28 days. Afterward, the concrete specimen was drilled to make a hole with a diameter of 22 mm. Then, deformed steel bar (DB) with a size of 12 mm and GPM were installed. All specimens were tested for the bonding strength at the age of 7 days. Test results found that the bonding strength using FA geopolymer mortar incorporated with FGD tended to marginal decrease. While the increase in NS/NH ratio could develop the bonding strength, except in a mixture of 30%FGD activated with NS/NH ratio at 2.5. According to test results, it was found that the reaction between CaSO_4 from FGD and reactive SiO_2 from NS solution had significant effects on the bonding strength of DB in concrete. In comparison with control concrete, the bonding strengths between DB and concrete using GPM as the bonding material were higher than that of concrete. It can be concluded that FA geopolymer with FGD could develop as the bonding material between embedded DB and concrete.

Keywords: Bond Strength of Steel Bar in Concrete, Chemical Anchor, Geopolymer Mortar, High-calcium Fly Ash, FGD-gypsum

Please cite this article as: S. Detphan, S. Sookasem, C. Detphan, K. Chompoovong, S. Yubonchit, T. Phoo-ngernkham, and S. Hanjitsuwan, "Bond strength of deformed steel bar in concrete using fly ash geopolymer mortar containing FGD-gypsum as bonding agent," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 623–635, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในงานก่อสร้างปัจจุบัน ซึ่งเมื่อสำรวจในก่อสร้างส่วนมากในประเทศไทยพบว่า โครงสร้างคอนกรีตและโครงสร้างเหล็กเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุด แต่ในบทความนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงโครงสร้างคอนกรีตเป็นหลักเนื่องด้วยปัจจัยด้านราคาต้นทุน และความซับซ้อนในการใช้งานน้อยกว่าโครงสร้างเหล็ก อย่างไรก็ตามการที่ทราบกันดีว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีอายุการใช้งานจำกัดซึ่งโดยปกติคอนกรีตจะมีอายุการใช้งานประมาณ 30-50 ปี [1] นอกจากนั้นงานต่อเติมเพื่อขยายโครงสร้างอาคารหรือจะเป็นการซ่อมแซมโครงสร้างอาคารที่มีความทรุดโทรมเป็นอีกหนึ่งลักษณะงานที่พบบ่อยในงานโครงสร้างคอนกรีต โดยลักษณะการต่อเติมหรือซ่อมแซมโครงสร้างอาคารส่วนมากนิยมใช้อุปกรณ์ฝังยึดในคอนกรีตปกติอุปกรณ์ฝังยึดในคอนกรีตจะแบ่งเป็นอุปกรณ์ฝังยึดแบบหล่อในที่ (Cast-in Anchor) เช่น Head Bolt, L Bolt และ J-Bolt และอุปกรณ์ฝังยึดแบบติดตั้งภายหลัง (Post-installed Anchor) ซึ่งสามารถติดตั้งได้โดยการเจาะคอนกรีตโครงสร้างด้วยสว่านแล้วจึงติดตั้งอุปกรณ์ฝังยึดประกอบด้วยอุปกรณ์ฝังยึดแบบใช้วัสดุยึดเกาะหรือพุกเคมี (Chemical Anchor) และอุปกรณ์ฝังยึดเชิงกล (Mechanical Anchor) [2], [3]

โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอุปกรณ์ฝังยึดแบบใช้วัสดุยึดเกาะ หรือพุกเคมีเพื่อทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างเหล็กเส้นกับคอนกรีต โดยพฤติกรรมการดึงออก (Pullout Test) หลังการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 พฤติกรรมทางกลที่เกิดขึ้น [4] ประกอบด้วย 1) การยึดเกาะของสารเคมีระหว่างเหล็กเส้นกับคอนกรีต 2) แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากความหยาบของผิวหน้าของวัสดุทั้งสองส่วน แรงตามขวางที่พื้นผิวเหล็กเส้นและความสัมพันธ์การลื่นไถลระหว่างเหล็กเส้น และคอนกรีตรอบๆ 3) การยึดเหนี่ยวทางกลหรือการแบกทานของบั้งกับพื้นผิวคอนกรีตโดยแต่ละองค์ประกอบจะช่วยในการยึดเกาะโดยการเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อแรงยึดเกาะของพุกเคมีเริ่มน้อยลง

เมื่อพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีต

จะมีกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้รับจากบั้งของเหล็กเส้นข้ออ้อย ซึ่งองค์ประกอบของแรงที่เกิดขึ้นประกอบด้วยแรงในแนวขนานและตั้งฉากกับเหล็กเส้นข้ออ้อย ทำให้มีความสามารถต้านทานได้มากกว่าเหล็กเส้นผิวเรียบที่มีแค่แรงในแนวขนานเท่านั้น โดยองค์ประกอบของแรงในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะเกิดแรงดันให้คอนกรีตรอบๆ เหล็กเส้นเกิดการแตกออกถ้าความต้านทานแรงดันหรือระยะหุ้มของคอนกรีตไม่เพียงพอ [4]

เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ฝังยึดแบบใช้วัสดุยึดเกาะที่ใช้ในการยึดเกาะระหว่างเหล็กเส้นกับคอนกรีตที่มีขายในท้องตลาดพบว่า จะมีคุณสมบัติในการยึดเหนี่ยวที่ดี แต่อย่างไรก็ตามราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น งานวิจัยที่ผ่านมาของ Songpiriyakij และคณะ [5] จึงพยายามศึกษาค้นคว้าวัสดุยึดเกาะทางเลือกและต้องมีคุณสมบัติเทียบเคียงกับวัสดุยึดเกาะที่มีขายในท้องตลาด นอกจากนั้นยังเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งวัสดุดังกล่าว คือ “วัสดุอีโพอลิเมอร์” โดยวัสดุอีโพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความนิยม และพัฒนาอย่างจริงจังเพื่อให้สามารถใช้งานในภาคอุตสาหกรรม การก่อสร้าง [6]-[9] วัสดุอีโพอลิเมอร์อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกา และอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุอีโพอลิเมอร์ ข้อดีของเถ้าลอยแคลเซียมสูงอีโพอลิเมอร์ คือ การอยู่ร่วมกันระหว่างผลผลิตโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต หรืออีโพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) กับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ภายในระบบส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่ดีเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิปกติ [10] ซึ่งจะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากวัสดุตั้งต้นส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุอีโพอลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดย Gue และคณะ [11] และ ชัตติย และคณะ [6] รายงานไว้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงอีโพอลิเมอร์ช่วยพัฒนากำลังอัดของอีโพอลิเมอร์ได้ นอกจากนี้ Hanjitsuwan และคณะ [12], [13] และ ชัตติย และคณะ [7] ใช้



กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบของวัสดุอีโพอลิเมอร์พบว่า คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอีโพอลิเมอร์มีแนวโน้มพัฒนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำลอยแคลเซียมสูง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30 พบปริมาณของแคลเซียมคาร์บอนเตปริมาณสูงซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนชั้นภายในระบบส่งผลให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพได้นอกจากนั้น ชูดากค์ และคณะ [8] ได้ศึกษาแหล่งให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากเอพิจิตียิปซัมซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่เอพิจิตียิปซัมร้อยละ 10 ในถ้ำลอยแคลเซียมสูงเพื่อผลิตวัสดุอีโพอลิเมอร์ช่วยพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของอีโพอลิเมอร์ได้อีกทั้งการใช้เอพิจิตียิปซัมยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านการหดตัวของวัสดุอีโพอลิเมอร์ได้ [14] เมื่อพิจารณาข้อดี และความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ของวัสดุอีโพอลิเมอร์ตั้งที่ได้มีการรายงานไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [15]–[17] พบว่า ถ้ำลอยแคลเซียมสูงอีโพอลิเมอร์มีค่ากำลังอัด และแรงยึดเกาะที่ดีมากเมื่อพิจารณาพร้อมกับวัสดุยึดเกาะตามท้องตลาดแสดงถึงสามารถพัฒนาเป็นวัสดุยึดเกาะระหว่างเหล็กเส้นกับคอนกรีตได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของการใช้เอพิจิตียิปซัมแทนที่ในถ้ำลอยแคลเซียมสูงเพื่อผลิตวัสดุอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ฝังยึดแบบใช้วัสดุยึดเกาะระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีต ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของการใช้วัสดุอีโพอลิเมอร์เป็นวัสดุยึดเกาะระหว่างเหล็กเส้นกับคอนกรีต และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเป็นวัสดุทางการค้าต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุตั้งต้นสำหรับผลิตอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์

1) วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตถ้ำลอยอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ประกอบด้วย ถ้ำลอยแคลเซียมสูง (FA) และเอพิจิตียิปซัม (FGD) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สำหรับ

การเตรียมเอพิจิตียิปซัมในงานวิจัยนี้ เอพิจิตียิปซัมจะถูกอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเอพิจิตียิปซัมถูกบดด้วยเครื่องลงสเองเจสิส และใช้เอพิจิตียิปซัมที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ซึ่งดำเนินการเตรียมวัสดุตามรายงานที่ผ่านมา [8] โดยถ้ำลอยและเอพิจิตียิปซัมมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และ 2.39 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยและเอพิจิตียิปซัมดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งถ้ำลอยแคลเซียมสูงมีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นหลัก ส่วนเอพิจิตียิปซัมมีองค์ประกอบของ CaO เป็นหลัก

2) สารละลายต่างประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , NS) ประกอบด้วย 13.45% Na_2O , 32.39% SiO_2 และ 54.16% H_2O

3) มวลรวมละเอียด (FRS) ใช้ทรายแม่น้ำ จากอำเภอนพมิตร จังหวัดนครราชสีมา มวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 และมอดุลัสความละเอียดเท่ากับ 1.85 ซึ่งการวิเคราะห์มอดุลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C33 [18] โดยมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยและเอพิจิตียิปซัม

| Chemical Compositions | FA (%) | FGD (%) |
|-------------------------|--------|---------|
| SiO_2 | 36.9 | 1.0 |
| Al_2O_3 | 18.1 | 2.8 |
| Fe_2O_3 | 11.9 | 0.3 |
| CaO | 21.4 | 75.5 |
| MgO | 2.8 | - |
| Na_2O | 2.3 | - |
| K_2O | 1.4 | - |
| SO_3 | 2.9 | 10.2 |
| LOI | 1.5 | 10.3 |

2.2 วัสดุตั้งต้นสำหรับผลิตคอนกรีต

โดยคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มวลรวมหยาบ หรือหินปูน

(CA) ขนาด 10 มิลลิเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.58 และความหนาแน่นเท่ากับ 1550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ จากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา (CRS) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.98 และมอดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.70

2.3 เหล็กเส้นข้ออ้อย

เหล็กเส้นข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD40 มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 23 เพอร์เซ็นต์ สามารถรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 50.32 เมกะปาสคาล และรับแรงดึงประลัยสูงสุดเท่ากับ 70 เมกะปาสคาล ซึ่งเหล็กเส้นข้ออ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณภาพผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM A996 [19]

2.4 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีบีซีเอ็ม ดังแสดงในตารางที่ 2 เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยเอฟจีดีบีซีเอ็มในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยทุกอัตราส่วนผสมของงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 [20]

การผสมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เริ่มต้นด้วยผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ให้เข้ากันดีก่อนการนำไปใช้เป็นของเหลวในส่วนผสม การผสมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีขั้นตอนการผสมดังนี้ เริ่มต้นด้วยการนำวัสดุตั้งต้นใส่ในหม้อผสม และดำเนินการผสมด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ให้ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่เตรียมไว้แล้วผสมให้ส่วนผสมเข้ากันเท่ากับ 1 นาที และใส่ทรายที่เตรียมไว้แล้วผสมอีก 1 นาที จนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีบีซีเอ็ม

| Mixes | FA (g) | FGD (g) | FRS (g) | NH (g) | NS (g) |
|----------------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 0FGD-1.0NS/NH | 100 | - | 100 | 30 | 30 |
| 0FGD-1.5NS/NH | 100 | - | 100 | 24 | 36 |
| 0FGD-2.0NS/NH | 100 | - | 100 | 20 | 40 |
| 0FGD-2.5NS/NH | 100 | - | 100 | 17 | 43 |
| 10FGD-1.0NS/NH | 90 | 10 | 100 | 30 | 30 |
| 10FGD-1.5NS/NH | 90 | 10 | 100 | 24 | 36 |
| 10FGD-2.0NS/NH | 90 | 10 | 100 | 20 | 40 |
| 10FGD-2.5NS/NH | 90 | 10 | 100 | 17 | 43 |
| 20FGD-1.0NS/NH | 80 | 20 | 100 | 30 | 30 |
| 20FGD-1.5NS/NH | 80 | 20 | 100 | 24 | 36 |
| 20FGD-2.0NS/NH | 80 | 20 | 100 | 20 | 40 |
| 20FGD-2.5NS/NH | 80 | 20 | 100 | 17 | 43 |
| 30FGD-1.0NS/NH | 70 | 30 | 100 | 30 | 30 |
| 30FGD-1.5NS/NH | 70 | 30 | 100 | 24 | 36 |
| 30FGD-2.0NS/NH | 70 | 30 | 100 | 20 | 40 |
| 30FGD-2.5NS/NH | 70 | 30 | 100 | 17 | 43 |

2.5 ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ [8]

ข้อมูลพื้นฐานด้านระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอฟจีดีบีซีเอ็มเมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบอ้างอิงตามรายงานวิจัยที่ผ่านมาของชูดากัด และคณะ [8]

ตารางที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีบีซีเอ็ม [8]

| Mixes | Initial Setting Time/Final Setting Time (min) | | | |
|-------|---|-------|-------|------|
| | NS/NH Ratios | | | |
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| 0FGD | 20/40 | 15/40 | 11/34 | 9/26 |
| 10FGD | 7/20 | 6/18 | 6/13 | 5/12 |
| 20FGD | 4/8 | 3/8 | 4/8 | 4/8 |
| 30FGD | 4/8 | 3/7 | 3/6 | 3/6 |

ตารางที่ 4 กำลังอัดของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสม
เอพีจีตีบิซึม [8]

| Mixes | 7-day Compressive Strength (MPa) | | | |
|-------|----------------------------------|------|------|------|
| | NS/NH Ratios | | | |
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| 0FGD | 22.4 | 25.3 | 27.2 | 29.8 |
| 10FGD | 28.0 | 29.2 | 31.4 | 35.5 |
| 20FGD | 26.2 | 25.3 | 26.4 | 27.3 |
| 30FGD | 16.9 | 15.5 | 16.7 | 18.7 |

2.6 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นคอนกรีตที่มีการออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 25 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 28 วัน การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมดำเนินการตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน ตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [21] ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการออกแบบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 25 เมกะปาสคาล (kg/m^3)

| PC (kg) | CRS (kg) | CA (kg) | Water (kg) |
|---------|----------|---------|------------|
| 430 | 813 | 770 | 266 |

ปฏิภาคส่วนผสมที่ถูกออกแบบไว้จะถูกดำเนินการผสมด้วยไม้มผสมคอนกรีต โดยหลังจากคอนกรีตถูกผสม และบ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $100 \times 100 \times 100$ มิลลิเมตร [รูปที่ 1 (ก)] จะถูกเจาะรูตรงกลางก่อนคอนกรีตแบบเปียกให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 22 มิลลิเมตร [รูปที่ 1 (ข)] และความลึกเท่ากับ 100 มิลลิเมตร เพื่อให้มีพื้นที่ของการเชื่อมประสานของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เพียงพอ (4 มิลลิเมตร) และเพื่อให้สามารถสังเกตพฤติกรรมของการรับแรงได้อย่างชัดเจน โดยปกติพื้นที่ของการเชื่อมประสานของวัสดุเชื่อมประสานประมาณ 1.5–4.0 มิลลิเมตร [5] นอกจากนี้หลังจากการเจาะรูคอนกรีตเรียบร้อยแล้วจะดำเนินการทำความสะอาดด้วยแปรงลวดทองเหลืองเพื่อขัดและทำความสะอาดรูเจาะภายในคอนกรีตก่อนดำเนินการ



(ก) การหล่อตัวอย่างคอนกรีต



(ข) เจาะรูคอนกรีตให้มีขนาด เท่ากับ 22 มิลลิเมตร
รูปที่ 1 การหล่อและเจาะรูตัวอย่างคอนกรีต

ติดตั้งเหล็กข้ออ้อยในลำดับต่อไป

2.7 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

หลังจากการเจาะรูตัวอย่างคอนกรีตเรียบร้อยแล้วจะดำเนินการเสียบเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร โดยต้องตรวจสอบฉากระหว่างตัวอย่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมก่อน (รูปที่ 2) หลังจากนั้นเทจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ลงในรูคอนกรีตเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเหล็กเส้นข้ออ้อยกับคอนกรีต (รูปที่ 3) และบ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จนครบอายุเท่ากับ 7 วัน โดยค่ากำลังยึดเหนี่ยวจะใช้ค่าเฉลี่ยจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวใช้วิธีการทดสอบแบบดึงออกซึ่งปรับปรุงจากมาตรฐาน ASTM C234 [22] ซึ่งสมการสำหรับคำนวณกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตดังแสดงในสมการที่ (1) โดยก่อนการทดสอบจะติดตั้ง Strain Gauge ตรงเหล็กเส้นข้ออ้อยเพื่อวัดค่าการยึดตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยทุกส่วนผสมโดยติดตั้งส่วนผสมละ 1 ตัวอย่างขณะรับแรงดึง [รูปที่ 4 (ก)] ซึ่งจะนำค่าการยึดตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยที่ได้รับจาก Strain Gauge



รูปที่ 2 ตรวจสอบฉากระหว่างตัวอย่างคอนกรีตกับเหล็กเส้น
ข้ออ้อย



รูปที่ 3 ลักษณะตัวอย่างคอนกรีตที่มีการใช้จีโอพอลิเมอร์
มอร์ตาร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

ลบกับค่าการเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยภายในคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุเชื่อมประสานเพื่อให้ได้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่แม่นยำขึ้น ส่วนลักษณะการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยการวัดค่าเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตจะใช้ LVDT เป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลซึ่งจะติดตั้งบนปลายสุดของเหล็กเส้นข้ออ้อย

$$\tau_{pullout} = \frac{P}{\pi dL} \quad (1)$$

เมื่อ $\tau_{pullout}$ คือ กำลังยึดเหนี่ยว (เมกะปาสคาล) P คือ แรงดึงสูงสุด (กิโลนิวตัน) d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ



(ก) การติด Strain Gauge บนผิวเหล็กเสริม



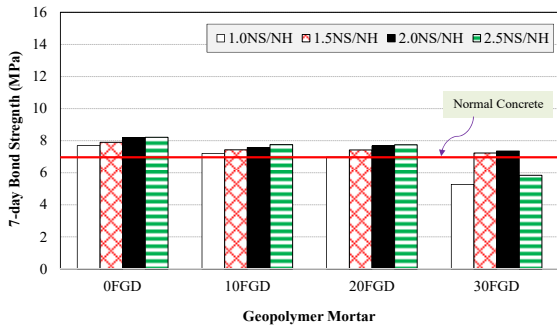
(ข) การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

รูปที่ 4 ลักษณะการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต

เหล็กเส้น (มิลลิเมตร) และ L คือ ความยาวระยะฝังของเหล็กเส้น (มิลลิเมตร)

3. ผลการทดลอง

ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอพิจีตีบซัมเป็นวัสดุยึดเกาะ และแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อายุการบ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า การแทนที่เอพิจีตีบซัมในเถ้าลอยแคลเซียมสูงร้อยละ 10-20 กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม การแทนที่เอพิจีตีบซัมร้อยละ 30 กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนโดยเฉพาะที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.5



รูปที่ 5 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่มีการใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซึ่งผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของแก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็ม (ตารางที่ 4) และมีค่าใกล้เคียงกับผลงานทดสอบของ Songpiriyakij และคณะ [5] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตควบคุม (ไม่มีอุปกรณ์ฝังยึดแบบใช้วัสดุยึดเกาะ) พบว่า การใช้แก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มมีค่าเทียบเท่ากับค่าแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมยกเว้นที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.5

ซึ่งการที่กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้แก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มเป็นวัสดุยึดเกาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน อาจเนื่องจากจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถประสานกับคอนกรีตได้ดี Phoo-ngernkham และคณะ [16], [17], [20] รายงานไว้ว่า การที่วัสดุจีโอพอลิเมอร์กับคอนกรีตเดิมสามารถประสานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีบริเวณพื้นที่สัมผัสเพราะว่าซิลิกาและอะลูมินาจากระบบจีโอพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

(C-S-H) มากขึ้นที่บริเวณจุดสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองส่วน แต่อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมอาจจะไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง เนื่องด้วยตามหลักการและทฤษฎีของ ASTM E488 [23] และ RILEM [24] ระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตเท่ากับ 4d และเมื่อวิเคราะห์ตามสมการจะมีค่าเท่ากับ 10.62 เมกะปาสคาล ซึ่งมากกว่าค่ายึดเหนี่ยวที่ทดสอบได้จากงานวิจัยนี้ (7.08 เมกะปาสคาล) โดยแท้จริงแล้วขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100×100×100 มิลลิเมตร ไม่เพียงพอต่อระยะฝังของเหล็กเสริมซึ่งขนาดตัวอย่างที่เพียงพอต่อระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยคือ อย่างน้อย 400 × 400 × 400 มิลลิเมตร (ความลึกของการฝังเหล็กเท่ากับ 100 มิลลิเมตร) และการดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C234 [22] จะทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมไม่ถูกต้องตามหลักการของมาตรฐาน ASTM E488 [23] และ RILEM [24] แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มุ่งเป้าหมายเพื่อศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ในใช้แก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มเป็นวัสดุยึดเกาะระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดจากงานวิจัยของ ชูดาภัก และคณะ [8] ร่วมกับผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตที่มีการใช้อุปกรณ์ฝังยึดแบบใช้วัสดุยึดเกาะจากแก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มพบว่า กำลังอัดของแก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 4 แต่อย่างไรก็ตาม กำลังยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการแทนที่เอฟจีดีอีพีซีเอ็มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากความสามารถทำงานได้ของแก้วลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มค่อนข้างต่ำเมื่อพิจารณาผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (ตารางที่ 3) และมีความหนืดสูงส่งผลให้ความเป็นเนื้อเดียวกันในรูเล็ก ๆ (รูเจาะขนาดเท่ากับ 22 มิลลิเมตร)

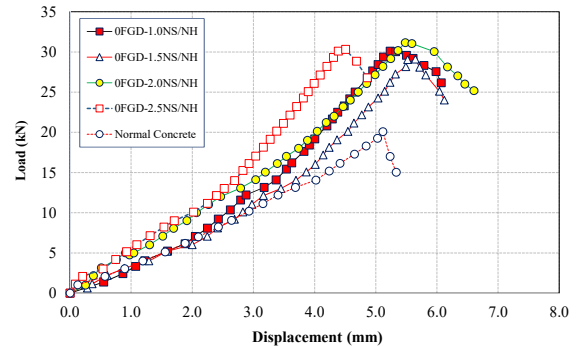
เมื่อพิจารณาปัจจัยของการแทนที่เอฟจีดีอีพีซีเอ็มในแก้วลอยแคลเซียมสูงร่วมกับอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน

ศตคุณ เดชพันธ์ และคณะ, “กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้แก้วลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มเป็นวัสดุยึดเกาะ.”

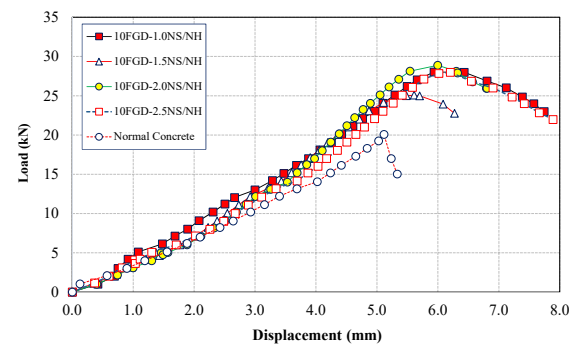
สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เพิ่มขึ้นยกเว้นการแทนที่เอฟเจดีอีพีซั่มร้อยละ 30 และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.5 การเพิ่มขึ้นของกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตอาจเนื่องจากอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น หมายถึง ปริมาณของซิลิกาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น และสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยและเอฟเจดีอีพีซั่ม และเกิดเป็นผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงมากขึ้นดังที่ได้มีการรายงานไว้ในงานวิจัยของชุตากัก และคณะ [8]

เมื่อพิจารณาการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวของการแทนที่เอฟเจดีอีพีซั่มร้อยละ 30 และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 เนื่องด้วยความแข็งแรงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มต่ำกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด (ดูตารางที่ 4) ส่วนที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 กำลังยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) จากเอฟเจดีอีพีซั่มเมื่อพิจารณาจากปริมาณของซัลเฟต (SO_3) ดังแสดงในตารางที่ 1 มีโอกาสเกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต หรือเอพทริงไคต์ภายในระบบ หรือแม้กระทั่งเกิดเป็นโซเดียมซัลเฟต ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัวและแตกร้าว ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะคราบเกลือที่เกิดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมเอฟเจดีอีพีซั่มร้อยละ 30 ของงานวิจัยชุตากัก และคณะ [8] นอกจากนี้ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องการเผา (LOI) ของเอฟเจดีอีพีซั่มเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์ทำนองเดียวกันกับงานวิจัยของ Chusilp และคณะ [25] ที่ดำเนินการแปรผันปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องการเผา (LOI) จากเถ้าขานอ้อยต่อกำลังอัดและความสามารถต้านทานซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ตาร์

รูปที่ 6-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอย

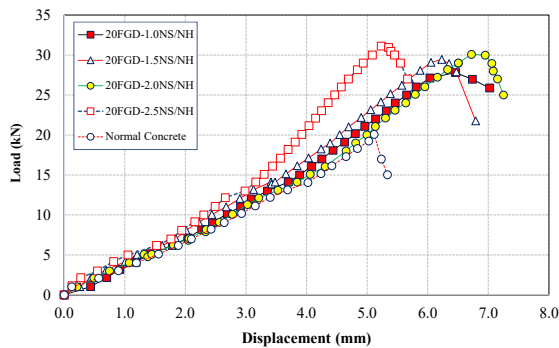


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟเจดีอีพีซั่มร้อยละ 0 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

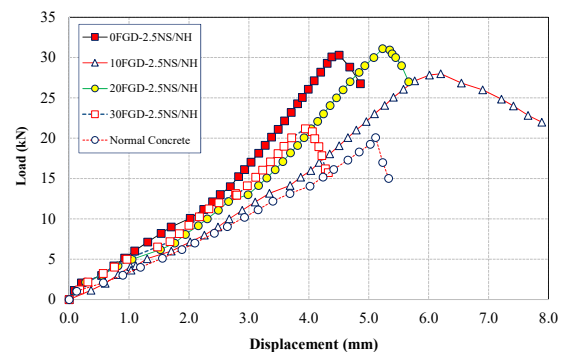


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟเจดีอีพีซั่มร้อยละ 10 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

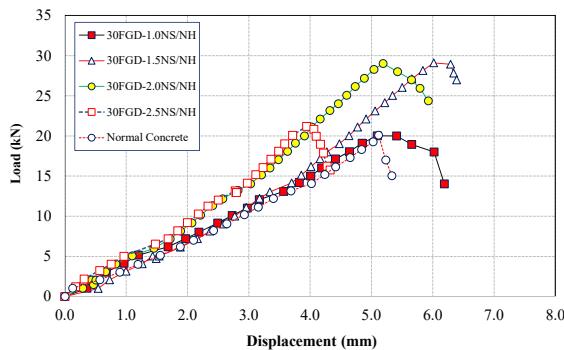
แคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟเจดีอีพีซั่มเป็นวัสดุเชื่อมประสานและแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า การเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เอฟเจดีอีพีซั่มในเถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งสัมพันธ์กับค่าแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเพฟจีดีอีบิซิมร้อยละ 20 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 และแปรผันปริมาณการใช้เพฟจีดีอีบิซิมในส่วนผสม



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเพฟจีดีอีบิซิมร้อยละ 30 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

เพฟจีดีอีบิซิมดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตร่วมกับค่าแรงยึดเหนี่ยว (รูปที่ 5) พบว่า การแทนที่เพฟจีดีอีบิซิมร้อยละ 10-20 มีค่าแรงยึดเหนี่ยวไม่แตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม ขณะที่การเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นข้อดีต่อการชะลอการวิบัติของคอนกรีต ส่วนปัจจัย

ของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตมาก ยกเว้นอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 ที่มีค่าการเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การแทนที่เพฟจีดีอีบิซิมร้อยละ 30 และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 จะสามารถรับแรงดึงได้ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 10

ซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูปที่ 11 พบว่า ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตเมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีลักษณะใกล้เคียงกัน กล่าวคือ เนื้อมอร์ตาร์มีความแข็งแรงสูง เมื่อพิจารณาจากรูป 11 (ก)-(ง) ที่ยังคงสภาพสมบูรณ์ทำนองเดียวกันกับลักษณะการวิบัติของการแทนที่เพฟจีดีอีบิซิมร้อยละ 20 และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะการวิบัติของการแทนที่เพฟจีดีอีบิซิมร้อยละ 30 และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 พบว่า ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ที่ต่ำส่งผลให้



(ก) OFGD-1.0NS/NH



(ข) OFGD-1.5NS/NH



(ค) OFGD-2.0NS/NH



(ง) OFGD-2.5NS/NH



(จ) 20FGD-2.5NS/NH



(ฉ) 30FGD-2.5NS/NH

รูปที่ 11 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีต

สามารถต้านทานแรงดึงได้ต่ำจึงพบว่า บั้งของมอร์ตาร์เกิดการเสียรูปขณะรับแรงดึงซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

4. สรุป

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

1) การใช้เอฟจีดีอีพีซั่มร้อยละ 10-20 ส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ขณะที่การแทนที่เอฟจีดีอีพีซั่มร้อยละ 30 กำลัง

ยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เอฟจีดีอีพีซั่มได้ถึงร้อยละ 20 เมื่อพิจารณา ร่วมกับข้อดีของเอฟจีดีอีพีซั่มที่มีคุณสมบัติด้านการลดเขยค่าหดตัวของจีโอพอลิเมอร์

2) กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ทุกปริมาณการแทนที่เอฟจีดีอีพีซั่มในถ้ำลอยแคลเซียมสูง อาจเนื่องจากซิลิกาที่มีความว่องไวจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถเร่งปฏิกิริยาภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์ได้

3) กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยแคลเซียมสูงผสมเอฟจีดีอีพีซั่มเป็นวัสดุยึดเกาะทุกอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเทียบเท่ากับกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นข้ออ้อยในคอนกรีตควบคุม ยกเว้นอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.5 ที่มีการแทนที่ด้วยเอฟจีดีอีพีซั่มร้อยละ 30

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ตามเลขที่สัญญา FRB630010-0174-P4-11 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Suansane, "Visual inspection of concrete cracks in MRT Ratchadapisek," M.CE. thesis, School of Construction and Infrastructure Management, Suranaree University of Technology, 2017 (in Thai).
- [2] D. Intarabut, H. Sodrum, T. Ongloy, T. Phoo-



- ngernkham, S. Punjanta, A. Pattarawongpaibol, and R. Sahamitmongkol, "Pull-out capacity of anchor in geopolymer concrete," presented at the 23th National Convention on Civil Engineering, Nakhon Nayok, Thailand, July 18–20, 2017 (in Thai).
- [3] D. Intarabut, H. Sodrum, T. Ongloy, B. Injorhor, and T. Phoo-ngernkham, "Innovative bonding agent of steel bars in concrete made from high calcium fly ash geopolymer mortar containing hybrid cement," presented at the 23th National Convention on Civil Engineering, Nakhon Nayok, Thailand, July 18–20, 2017 (in Thai).
- [4] *Building Code Requirement for Structure Concrete Practice (ACI 318-08) and Commentary*, ACI 318, 2008.
- [5] S. Songpiriyakij, T. Pulngern, P. Pungpremtrakul, and C. Jaturapitakkul, "Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste," *Materials and Design*, vol. 32, no. 5, pp. 3021–3028, 2011.
- [6] K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Detphan, C. Detphan, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt, "Effect of portland cement content on compressive strength and elastic modulus of high-calcium fly ash geopolymer mortar containing various type of alkali solution," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 4, 2020 (in Thai).
- [7] K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Detphan, C. Detphan, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt, "Properties of pervious geopolymer concrete made from high-calcium fly ash containing calcium carbide residue," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 2, 280–290, 2020 (in Thai).
- [8] C. Detphan, T. Phoo-ngernkham, S. Detphan, K. Chompoovong, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt, "Factors of FGD-gypsum replacement and alkaline solution ratio on compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, 2021 (in Thai).
- [9] C. Detphan, S. Detphan, K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt, "Mechanical properties of high-calcium fly ash geopolymer with nano-SiO₂ particle sizes," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, 2021 (in Thai).
- [10] P. Chindapasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 12, pp. 4876–4883, 2012.
- [11] X. Guo, H. Shi, L. Chen, and W. A. Dick, "Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 173, no. 1–3, pp. 480–486, 2010.
- [12] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham, and N. Damrongwiriyanupap, "Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 128–134, 2017.
- [13] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham, L. Y. Li, N. Damrongwiriyanupap, and P. Chindapasirt, "Strength development and durability of alkali-activated fly ash mortar with calcium carbide residue as additive," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 714–723, 2018.

- [14] S. Hanjitsuwan, B. Injorhor, T. Phoo-ngernkham, N. Damrongwiriyanupap, L.Y. Li, P. Sukontasukkul, and P. Chindapasirt, "Drying shrinkage, strength and microstructure of alkali-activated high-calcium fly ash using FGD-gypsum and dolomite as expansive additive," *Cement and Concrete Composites*, 2020.
- [15] Y. C. Liang, Z. M. Ye, F. Vernerey, and Y. Xi, "Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 5, pp. 04014163, 2015.
- [16] V. Sata, A. Wongsas, and P. Chindapasirt, "Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 33–39, 2013.
- [17] T. Phoo-ngernkham, C. Phiangphimai, D. Intarabut, S. Hanjitsuwan, N. Damrongwiriyanupap, L.Y. Li, and P. Chindapasirt, "Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue," *Construction and Building Materials*, vol. 247, pp. 118543, 2020.
- [18] *Standard Specification for Concrete Aggregate*, ASTM C33-03, 2003.
- [19] *Standard Specification for Rail-steel and Axle-steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement*. ASTM A996/A996M-16, 2016.
- [20] T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridditirud, S. Hatanaka, and P. Chindapasirt, "High calcium fly ash geopolymer mortar containing portland cement for use as repair material," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 482–488, 2015.
- [21] *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI 211.1-91, 1991.
- [22] *Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel*, ASTM C234-91, 1991.
- [23] *Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements*, ASTM E488/E488M-15, 2015.
- [24] R. C. Rilem, *6 Bond Test for Reinforcement Steel. 2. Pull-out Test. RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. E & FN SPON, 1994.
- [25] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 12, pp. 3523–3531, 2009.