วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 30, ฉบับที่ 2 เม.ย.–มิ.ย. 2563
The Journal of KMUTNB., Vol. 30, No. 2, Apr.–Jun. 2020

บทความวิจัย

คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ขัตติย ชมพูวงศ์ ธนากร ภูเงินขำ* ศตคุณ เดชพันธ์ และ ชุดาภัค เดชพันธ์
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์
สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5362 8964 อีเมล: tanakorn.ph@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.01.003
รับเมื่อ 2 สิงหาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 19 กันยายน 2562 ตอบรับเมื่อ 23 กันยายน 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 16 มกราคม 2563
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยศึกษาการใช้วัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุตั้งต้นและวัสดุเร่งการก่อตัวในการพัฒนาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาในส่วนผสม และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนของมวลรวมหยาบต่อวัสดุประสานเท่ากับ 8.0 และอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ทุกอัตราส่วนผสม โดยศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5, 10 และ 15 โมลาร์ โดยทำการทดสอบกำลังอัด กำลังดัด ความหนาแน่น อัตราส่วนช่องว่างและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ผลการทดสอบพบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่เถ้าลอยสามารถปรับปรุงกำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนได้ โดยเฉพาะการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร้อยละ 10 ผสมกับของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 สามารถให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนสูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 79.41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความพรุนที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ระหว่าง 30.80–32.65% และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 2.17–3.16 เซนติเมตร/วินาที

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน เถ้าลอยแคลเซียมสูง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ กำลังรับแรงอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

การอ้างอิงบทความ: ขัตติย ชมพูวงศ์ ธนากร ภูเงินขำ ศตคุณ เดชพันธ์ ชุดาภัค เดชพันธ์ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, "คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 280–290, เม.ย.–มิ.ย. 2563.

Research Article

Properties of Pervious Geopolymer Concrete Made from High-calcium Fly Ash Containing Calcium Carbide Residue

Khattiya Chompoovong, Tanakorn Phoo-ngernkham*, Satakhun Detphan and Chudapak Detphan
Sustainable Construction Material and 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
Prinya Chindaprasirt
Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 5362 8964, E–mail: tanakorn.ph@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.01.003
Received 2 August 2019; Revised 19 September 2019; Accepted 23 September 2019; Published online: 16 January 2020
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study the properties of Pervious Geopolymer Concrete (PGC) by using Fly Ash (FA) and Calcium Carbide Residue (CCR) as a precursor and a promoter, respectively to develop the properties of PGC. The CCR was used to replace FA at the dosages of 0%, 10%, 20%, and 30% by weight of a binder. Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) solutions were used as the liquid portion in the mixtures. The Na_2SiO_3-to-NaOH ratio of 2.0, coarse aggregate-to-binder ratio of 8.0, and alkali liquid/binder (L/B) ratio of 0.50 were used in all mixes. The different ratio of NaOH concentrations was at 5, 10, and 15 molar to test on the compressive strength, flexural strength, density, total void ratio, and water permeability coefficient of the PGCs. The test results found that the use of FA with CCR could enhance the compressive and flexural strengths of PGCs. A mixture of 10%CCR and 15M of concentrated NaOH mixed with 0.50 of L/B ratio gave the highest of 28-curing day compressive strength of PCGs, which was 79.41 ksc. Moreover, the void ratio and permeability coefficient at 28-curing days varied between 30.80–32.65% and 2.17–3.16 cm/s, respectively.

Keywords: Pervious Geopolymer Concrete, High-Calcium Fly Ash, Calcium Carbide Residue, Compressive Strength, Permeability Coefficient

Please cite this article as: K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Detphan, C. Detphan, S. Hanjitsuwan, and P. Chindaprasirt, "Properties of pervious geopolymer concrete made from high-calcium fly ash containing calcium carbide residue," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 2, pp. 280–290, Apr.–Jun. 2020 (in Thai).

1. บทนำ

คอนกรีตพรุน คือ คอนกรีตที่มีสมบัติโดดเด่นต่างจากคอนกรีตทั่วไปคือมีโพรงช่องว่างต่อเนื่องที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ ด้วยคุณสมบัติพิเศษนี้ทำให้คอนกรีตพรุนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น การนำคอนกรีตพรุนมาประยุกต์เป็นวัสดุชั้นผิวทาง และชั้นรองผิวทาง รวมกับการจัดการระบบระบายน้ำ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นคอนกรีตทั่วไปแสดงให้เห็นว่าพื้นคอนกรีตพรุนสามารถลดการเลื่อนไถลของรถยนต์ ลดการสะท้อนของแสงไฟได้ดี และทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างดินกับอากาศ

ในปัจจุบันจีโอพอลิเมอร์สามารถใช้เป็นหนึ่งในวัสดุทางเลือกสำหรับงานก่อสร้าง [1] โดยเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [2] จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก และทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา [3] เพื่อให้เกิดการแข็งตัวและรับกำลังได้

ในประเทศไทยส่วนมากใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเถ้าลอยดังกล่าวเป็นผลพลอยได้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยปกติเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงต่ำที่อุณหภูมิปกติ (ประมาณ 25 องศาเซลเซียส) [4] ปริญญา และคณะ [5] รายงานว่า การใช้ความร้อนประมาณ 40–90 องศาเซลเซียส สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ได้ ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดต่อการนำไปใช้งานในภาคสนาม ดังนั้น นักวิจัยหลายท่าน [6], [7] จึงได้พยายามปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดที่อุณหภูมิปกติโดยการใช้สารผสมเพิ่มแทนที่เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ เช่น งานวิจัยของธนากร และคณะ [8] ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนั้น จากงานวิจัยดังกล่าว ยังรายงานอีกว่าผลผลิตไฮเดรชัน (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต) จากปูนซีเมนต์แทรกอยู่กับโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตหรือจีโอพอลิเมอร์เจลทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ แสงสุรีย์ และคณะ [4] ได้รายงานไว้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ แต่ยังสามารถเพิ่มความร้อนให้กับระบบของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากเหตุผลข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิปกติได้ นอกจากนั้น ในปัจจุบันนักวิจัยหลายท่านได้พยายามใช้วัสดุชนิดอื่นทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นสารผสมเพิ่ม เช่น สกลวรรณ และคณะ [6] ที่ได้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพื่อผลิตวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ ซึ่งกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซอะเซทิลีนที่สามารถเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ได้ การใช้ประโยชน์ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในงานก่อสร้างยังถือเป็นการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนในการผลิตด้วย สำหรับการใช้ประโยชน์กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงนอกจากนั้นจากงานวิจัยของสกลวรรณ และคณะ [7] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าหนักจีโอพอลิเมอร์พบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่เถ้าหนักเพื่อผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติใกล้เคียงการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าหนัก ในปัจจุบันมีงานวิจัยของชารินทร์ และคณะ [9] ได้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าลอยเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีตจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอยมีค่าเทียบเคียงกับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนั้น ค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยของณัฐพงศ์ และคณะ [10] พบว่า คอนกรีตจากเถ้าลอยผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตควบคุม และงานวิจัยของสุขสันติ์ และคณะ [11] ได้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของดินทรายโดยการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยพบว่า ปริมาณการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นช่วยพัฒนากำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไปในอนาคต

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ประกอบด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ดังแสดงในรูปที่ 1 และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ดังแสดงในรูปที่ 2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผลพลอยได้ จากการผลิตก๊าซอะซิทีลีนของบริษัท สาย 5 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ จำกัด จังหวัดนครปฐม ขั้นตอนการเตรียมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในงานวิจัยนี้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์จะถูกอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกากแคลเซียมคาร์ไบด์ถูกบดด้วยเครื่องลอสแองเจลีส และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งเถ้าลอยแคลเซียมสูง และกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนั้นตารางที่ 1 ยังแสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์กับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยเถ้าลอยแคลเซียมสูงและกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และ 2.25 ตามลำดับ ขณะที่หินปูนขนาดเท่ากับ 3/8 นิ้ว

รูปที่ 1 เถ้าลอยแคลเซียมสูง

รูปที่ 2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

(4.75–9.50 มิลลิเมตร) และอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ถูกนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ (CA) ซึ่งหินปูนมีค่าหน่วยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ มอดุลัสความละเอียด ร้อยละการดูดซึมน้ำ และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนเท่ากับ 1545 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 2.69, 6.05, 0.32 และ 31.5 ตามลำดับ

สารละลายที่ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 5, 10 และ 15 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O ร้อยละ 12.71, SiO_2 ร้อยละ 30.19 และ H_2O ร้อยละ 57.10

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากแคลเซียมคาร์ไบด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	FA (%)	CCR (%)	PC (%)
SiO_2	35.87	6.49	20.80
Al_2O_3	19.91	2.55	4.70
Fe_2O_3	12.07	3.25	3.40
CaO	20.68	70.78	65.30
MgO	2.40	0.70	1.50
Na_2O	1.88	-	0.40
K_2O	2.36	7.94	0.10
SO_3	4.25	0.66	2.70
LOI	0.58	1.35	0.90

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5, 10 และ 15 โมลาร์ ตามลำดับ สำหรับการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจะใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อวัสดุประสานเท่ากับ 8.0 ทุกอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ส่วนผสม	FA (%)	CCR (%)	CA (%)	NH (%)	NS (%)
5M0CCR	100	-	800	16.67	33.33
5M10CCR	90	10	800	16.67	33.33
5M20CCR	80	20	800	16.67	33.33
5M30CCR	70	30	800	16.67	33.33
10M0CCR	100	-	800	16.67	33.33
10M10CCR	90	10	800	16.67	33.33
10M20CCR	80	20	800	16.67	33.33
10M30CCR	70	30	800	16.67	33.33
15M0CCR	100	-	800	16.67	33.33
15M10CCR	90	10	800	16.67	33.33
15M20CCR	80	20	800	16.67	33.33
15M30CCR	70	30	800	16.67	33.33

รูปที่ 3 ลักษณะจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูงและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ถูกผสมให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เตรียมผสมไว้แล้ว และใส่มวลรวมหยาบในส่วนผสม และผสมต่อเป็นเวลาประมาณ 2 นาที โดยลักษณะจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์หลังการผสม ดังแสดงในรูปที่ 3

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ดำเนินการเทลงแบบหล่อ แล้วทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ดำเนินการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกอีกครั้ง และเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิจนครบอายุการทดสอบตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1) กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C39/C39M-04a [12]

2) กำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนใช้ตัวอย่างทรงปริซึมขนาด 7.5×7.5×30 เซนติเมตร โดยใช้วิธี Four-point Loading ตามมาตรฐาน ASTM C78 [13]

3) ค่าอัตราส่วนโพรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1688/C 1688M-08 [14] อัตราส่วนโพรงสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$A_t(\%) = \left[1 - \left(\frac{w_2 - w_1}{\rho V}\right)\right] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $A_t(\%)$ = อัตราส่วนโพรงรวม (%) w_1 = น้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนในน้ำ (g) w_2 = น้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนในอากาศที่อิ่มตัวผิวแห้ง (g) ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3) และ V = ปริมาตรของตัวอย่าง (cm^3)

4) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนใช้วิธีทดสอบแบบ Constant Head Method โดยอาศัยหลักการจากกฎของดาร์ซีหรือ Darcy's Law โดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านน้ำสามารถหาได้จากสมการที่ (2) [15]

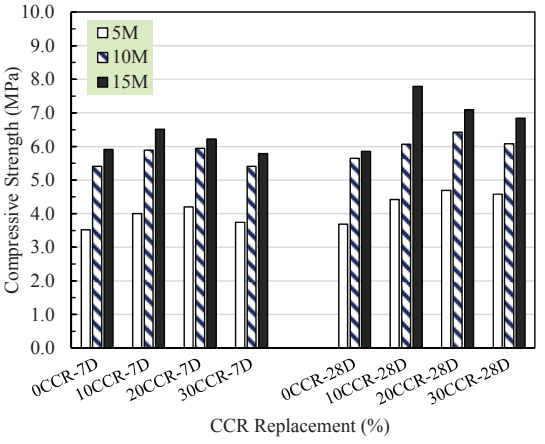
$$k_t = \frac{\left(\frac{L}{H}\right)Q}{A(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

เมื่อ k_t = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (cm/s) L = ความสูงของตัวอย่าง (cm) H = ความแตกต่างของระดับน้ำ (cm) Q = ปริมาตรน้ำไหลออกที่วัดได้ในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 (cm^3) A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (cm^2) และ s = ระยะเวลาที่วัดปริมาณน้ำ (s)

3. ผลการวิจัย

3.1 กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดสอบข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

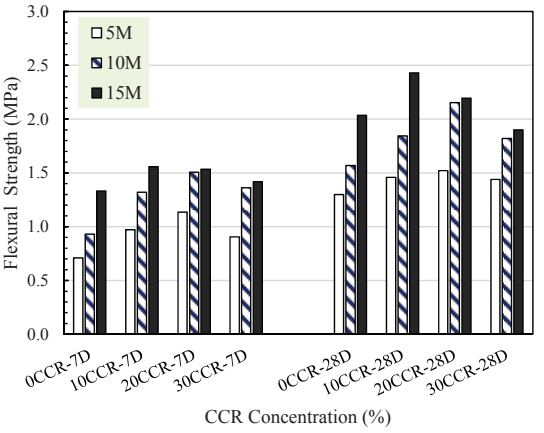
ช่วยพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน เนื่องจากปริมาณของแคลเซียมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยามากขึ้นภายในระบบเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนควบคุม (ไม่มีการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์) ซึ่งงานวิจัยของ Palomo และคณะ [16] ได้มีการรายงานไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมไอออนสามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและเกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกรตไฮเดรต (C-A-S-H) มากขึ้นภายในระบบจีโอพอลิเมอร์ และผลผลิตดังกล่าวอยู่ร่วมกับจีโอพอลิเมอร์เจล ซึ่งการที่โครงสร้างทางจุลภาคมีผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกรตไฮเดรต (C-A-S-H) เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อของเพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้นส่งให้กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจัยของการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จำเป็นต้องมีการพิจารณาร่วมกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ซึ่งค่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ถูกนำเสนอไว้ในรายงานวิจัยที่ผ่านมาของสกลวรรณ และคณะ [6] พบว่า ปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นให้ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม จากผล

การทดสอบของสกลวรรณ และคณะ [6] พบว่า การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 10 มีระยะเวลาการก่อตัวที่เหมาะสมต่อความสามารถทำงานได้

นอกจากนั้นยังพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ ให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนสูงกว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 และ 10 โมลาร์ ปริมาณของการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร้อยละ 20 เป็นปริมาณการแทนที่เหมาะสม ส่วนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ สามารถแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยได้เพียงร้อยละ 10 เท่านั้น อาจเนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ทำให้การควบแน่นเพื่อเกิดปฏิกิริยาของระบบจีโอพอลิเมอร์จะถูกขัดขวาง [17] อีกทั้งส่วนเกินของความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนเป็นสาเหตุทำให้มีเกิดการเร่งการเกิดปฏิกิริยาของอะลูมิโนซิลิเกตเจลส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง [18] จากงานวิจัยของสกลวรรณ และคณะ [6], [7] รายงานไว้ว่า สามารถแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงได้ถึงร้อยละ 30 แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน การเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วระหว่างเถ้าลอยแคลเซียมสูงกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยเฉพาะปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 20 และ 30 ซึ่งมีระเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 35 และ 25 นาที ตามลำดับ ส่งผลให้การยึดเกาะกับมวลรวมหยาบไม่ดีทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อมีการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 20 และ 30 มีแนวโน้มลดลง

3.2 กำลังดัด

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า กำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นแคลเซียมออกไซด์จากการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ช่วยพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีตพรุน ส่วนปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ ให้ค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนสูงกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปัจจัยของการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร่วมกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 และ 10 โมลาร์ ปริมาณของการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร้อยละ 20 เป็นปริมาณการแทนที่เหมาะสม ส่วนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณของการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร้อยละ 10 เป็นปริมาณการแทนที่เหมาะสม ทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน



รูปที่ 5 กำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3 ความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่าง

ความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ดังแสดงในตารางที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่า ปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง (เถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ขณะที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25) เมื่อพิจารณาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยค่าความหนาแน่นของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นมีค่ามากกว่า

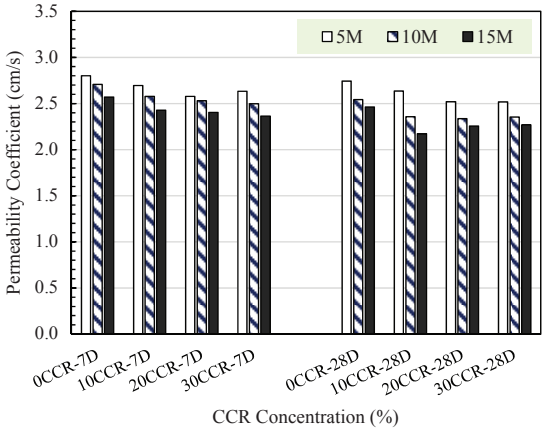
ขณะที่อัตราส่วนช่องว่างเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อสมบัติของคอนกรีตพรุน ค่าอัตราส่วนช่องว่างเป็นค่าที่บ่งบอกความพรุนทั้งหมดภายในระบบหรือปริมาณโพรงมากน้อยเพียงใด กล่าวคือ เมื่อค่าอัตราส่วนช่องว่างมากจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าการซึมผ่านน้ำเช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มต่ำ ในทางตรงกันข้ามค่าอัตราส่วนของว่างที่ต่ำ ความพรุนต่ำและค่าการซึมผ่านของน้ำก็มีค่าน้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตพรุนสูงขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตพรุนจะมีค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างร้อยละ 15–35 [19] เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3 พบว่า อัตราส่วนช่องว่างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีค่าอยู่ในเกณฑ์ของอัตราส่วนช่องว่างของคอนกรีตพรุนปกติ และค่าอัตราส่วนช่องว่างสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน (รูปที่ 4) กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนช่องว่างมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยจนถึงปริมาณการแทนที่เหมาะสม และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตพรุนมีความแน่นตัวมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่า ค่าอัตราส่วนช่องว่างมีค่าสูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 20 อาจเนื่องจากที่ปริมาณการแทนที่ดังกล่าวจะมีการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วระหว่างแคลเซียมออกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง [6], [7] ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างมวลรวมหยาบกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์น้อยทำให้เกิดโพรงและช่องว่างมากขึ้น

ตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ส่วนผสม	อัตราส่วนช่องว่าง (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
5M0CCR	32.40	1703
5M10CCR	32.15	1686
5M20CCR	32.00	1671
5M30CCR	32.15	1667
10M0CCR	31.80	1706
10M10CCR	31.60	1693
10M20CCR	31.45	1685
10M30CCR	31.55	1684
15M0CCR	31.60	1714
15M10CCR	30.80	1707
15M20CCR	30.95	1697
15M30CCR	31.25	1685

3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และความเข้มข้นของสารละลาย



รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกสัดส่วนผสม เนื่องจากปริมาณเพสต์และขนาดของมวลรวมที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ปริมาณโพรงช่องว่างและความต่อเนื่องของโพรงช่องว่างส่งผลต่อการซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพียงเล็กน้อย

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับคอนกรีตพรุนจากซีเมนต์เพสต์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอยผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าใกล้เคียงกันกับคอนกรีตพรุนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งโดยปกติค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนจากซีเมนต์เพสต์ จะมีค่าระหว่าง 0.001–10 เซนติเมตรต่อวินาที [19] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Debnath และ Sarkar [20] พบว่า งานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (2.17–2.8 เซนติเมตรต่อวินาที) สูงกว่างานวิจัยของ Debnath และ Sarkar [20] ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำระหว่าง 1.2–2.0 เซนติเมตรต่อวินาที เนื่องจากปัจจัยของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณมวลรวมหยาบที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นงานวิจัยของ Debnath และ Sarkar [20] มีการใช้มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 10–20 ขณะที่งานวิจัยนี้ไม่มีการใช้มวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีตพรุน แต่อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนของงานวิจัยนี้ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ ACI522R-10 [19]

4. สรุป

1) การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยช่วยปรับปรุงสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนให้ดีขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถทำปฏิกิริยาและเกิดผลผลิตภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์มากขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นช่วยพัฒนาสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนให้ดีขึ้น

2) อัตราส่วนช่องว่างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอยร้อยละ 30 ทุกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3) ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าลอย แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นแปรผันโดยตรงกับค่าความถ่วงจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณเพสต์และขนาดของมวลรวมที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ปริมาณโพรงช่องว่างและความต่อเนื่องของโพรงช่องว่างส่งผลต่อการซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพียงเล็กน้อย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สัญญาเลขที่ NKR2561REV020 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan, and S. Hatanaka, "The effect of adding nano-SiO_2 and nano-Al_2O_3 on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature," *Materials & Design*, vol. 55, pp. 58–65, 2014.

[2] T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, C. Suksiripattanapong, J. Thumrongvut, J. Suebsuk, and S. Sookasem, "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, 2016.

[3] J. Davidovits, "Geopolymers: Inorganic polymeric new materials," *Journal of Thermal Analysis*, vol. 37, no. 8, pp. 1633–1656, 1991.

[4] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 269–274, 2014.

[5] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 224–229, 2007.

[6] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham, L.Y. Li, N. Damrongwiriyanupap, and P. Chindaprasirt, "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.

[7] 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.

[8] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Pangdaeng, and T. Sinsiri, "Properties of high calcium fly ash geopolymer containing portland cement additive," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 2, pp. 214–220, 2013.

[9] C. Namarak, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Bar-concrete bond in mixes containing calcium car bide residue, fly ash and recycled concrete aggregate," *Cement and Concrete Composites*, vol. 89, pp. 31–40, 2008.

[10] N. Makaratat, C. Jaturapitakkul, C. Namarak, and V. Sata, "Effects of binder and $CaCl_2$ contents on the strength of calcium carbide residue-fly ash concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp. 436–443, 2011.

[11] S. Horpibulsuk, C. Phetchuay, A. Chinkulkijniwat, and A. Cholaphatsorn, "Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash," *Soils and Foundations*, vol. 53, no. 4, pp. 477–486, 2013.

[12] *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C39, 2001.

[13] *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C78, 2010.

[14] *Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C1688/ C1688-08, 2013.

[15] Y. Zaetang, A. Wongsa, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Use of lightweight aggregates in pervious concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 585–591, 2013.

[16] A. Palomo, M. T. Blanco-Varela, M. L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, and M.W. Grutzeck, "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 7, pp. 997–1004, 1999.

[17] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, and C. Yue, "Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer," *Applied Clay Science*, vol. 43, no. 2, pp. 218–223, 2009.

[18] W. K. W. Lee and J. S. J. Van Deventer, "The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 211, no. 2–3, pp. 115–126, 2002.

[19] *Report on Pervious Concrete*, American Concrete Institute Standard ACI 522R-10, 2010.

[20] B. Debnath and P.P. Sarkar, "Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 213, pp. 643–651, 2019.