



สมบัติทางกายภาพของเส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติเมื่อใช้เศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อย

คำภี จิตชัยภูมิ ศตคุณ เดชพันธ์ ชูตาก็ค เดชพันธ์ และ ธนากร ภูเงินขำ

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์*

สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 1478 9888 อีเมล: yim_kachan@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.005

รับเมื่อ 17 สิงหาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 15 กันยายน 2563 ตอรับเมื่อ 18 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 9 พฤศจิกายน 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบในเส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติ โดยศึกษาปริมาณการแทนที่คอนกรีตรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ที่มีต่อระยะเวลาก่อตัว กำลังอัด มอดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่อายุการบ่มเท่ากับ 1 วัน โดยออกแบบส่วนผสมของเส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามงานวิจัยที่ผ่านมา โดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนสารละลายไซเตียมซิลิเกตต่อสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ เท่ากับ 1.0 ส่วนคอนกรีตปกติถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI211.1-91 ผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวของเส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้คอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังอัด และมอดูลัสยืดหยุ่นของเส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม กำลังอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้คอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราส่วนปัวซองของทั้งระบบเส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณคอนกรีตรีไซเคิลในส่วนผสมซึ่งสอดคล้องกับค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุดมากขึ้น จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตรีไซเคิลสามารถใช้ทดแทนมวลรวมหยาบธรรมชาติสำหรับผลิตคอนกรีตได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบของจีโอพอลิเมอร์

คำสำคัญ: คอนกรีตรีไซเคิล เส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต กำลังอัด มอดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง

การอ้างอิงบทความ: คำภี จิตชัยภูมิ, ศตคุณ เดชพันธ์, ชูตาก็ค เดชพันธ์, ธนากร ภูเงินขำ, ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ และ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, "สมบัติทางกายภาพของเส้นลวดเคลือบสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติเมื่อใช้เศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อย," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 712-723, ก.ค.-ก.ย. 2565.



Mechanical Properties of High-calcium Fly Ash Geopolymer and Normal Concretes Using Recycled Concrete Aggregate Replaced Crushed Limestone

Kompee Jitchaiyapoom, Satakhun Detphan, Chudapak Detphan 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

Nattapong Damrongwiriyanupap

Civil Engineering Program, School of Engineering, University of Phayao, Thailand

Sakonwan Hanjitsuwan*

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

* Corresponding Author, Tel. 06 1478 9888, E-mail: yim_kachan@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.005

Received 17 August 2020; Revised 15 September 2020; Accepted 18 September 2020; Published online: 9 November 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study the influence of using Recycled Concrete Aggregate (RCA) in high-calcium Fly Ash (FA) geopolymer and normal concretes. The use of RCA to replace Normal Coarse Aggregate (NCA) at the percentage rates of 0, 20, 40, 60, 80, and 100 by weight were studied. The effects of using RCA in both high-calcium FA geopolymer and normal concretes on setting time, compressive strength, elastic modulus, and Poisson's ratio at curing time of 1 day were tested. In this work, the mix proportions of high-calcium FA geopolymer concrete were based on the previous work. The alkaline solution/binder ratio of 0.50 and sodium silicate solution/10M sodium hydroxide solution ratio of 1.0 were used. For the normal concrete, it was based on the ACI 211.1-91 for designing its mix proportion. The test results revealed that the setting time of high-calcium FA geopolymer and normal concretes tended to decrease with increasing RCA content. Compressive strength and elastic modulus high-calcium FA geopolymer concrete tended to increase; however, they tended to decrease in the normal concrete system. While Poisson's ratio of both high-calcium FA geopolymer and normal concretes tended to decrease with increasing RCA content in the mixture. The outcomes correspond to the strain at peak stress values that was increased. From the test results above, it can be concluded that the RCA can be used as the coarse aggregate for making concrete, especially in the geopolymer system.

Keywords: Recycled Concrete Aggregate, High-calcium Fly Ash Geopolymer Concrete, Compressive Strength, Modulus of Elastic, Poisson's Ratio

Please cite this article as: K. Jitchaiyapoom, S. Detphan, C. Detphan, T. Phoo-ngernkham, N. Damrongwiriyanupap, and S. Hanjitsuwan, "Mechanical properties of high-calcium fly ash geopolymer and normal concretes using recycled concrete aggregate replaced crushed limestone," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 712–723, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).



1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอุตสาหกรรมที่ทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสู่บรรยากาศคิดเป็นประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในบรรยากาศโลก [1] จากข้อจำกัดและปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยพยายามพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเพื่อเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุที่กำลังได้รับความนิยมคือวัสดุจีโอพอลิเมอร์ [2] Davidovits [3] รายงานไว้ว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่สามารถสังเคราะห์จากวัสดุตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของซิลิกา และอะลูมินาทำปฏิกิริยาภายในระบบด้วยสารละลายต่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต และกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะทำให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัว และรับกำลังได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สำหรับในประเทศไทย การผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะสังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นหลัก โดยเถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ข้อดีของการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ คือ ไม่ต้องเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนเหมือนกับระบบของเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ นอกจากนั้นระบบของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะมีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วขึ้นซึ่งเป็นข้อดีของการนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมสำหรับงานที่ต้องการเวลาอันรวดเร็ว เช่น งานซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต ดังแสดงในรายงานวิจัยที่ผ่านมา [4]–[7]

นอกจากนั้นการพัฒนาอุตสาหกรรม และโครงสร้างพื้นฐานอย่างต่อเนื่องในปัจจุบันส่งผลให้มีความต้องการใช้วัสดุก่อสร้างเพิ่มขึ้น ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุหลักสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีต เช่น งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก งานพื้น และงานถนนคอนกรีต และส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่ใช้จะเห็นได้เป็นวัสดุที่ได้รับจากธรรมชาติ และมีปริมาณที่ค่อนข้างจำกัด ดังนั้นการบริหารจัดการวัสดุเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตจึงเป็นแนวทางที่ควรได้รับการศึกษา และ

พัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับใช้งานอย่างจริงจังในอนาคต และเพื่อเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด

ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุรีไซเคิลมาใช้ประโยชน์ เช่น การใช้เศษคอนกรีต หรือเศษอิฐมวลเบา หรือเศษคอนกรีตบดลือกทดแทนวัสดุจากธรรมชาติในการใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีต [8] จากรายงานวิจัยของเทอดศักดิ์ [9] พบว่า คอนกรีตจะมีค่ากำลังอัดประลัย และกำลังตัดประลัยลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 30 และ 33 ตามลำดับเมื่อมีการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 100 นอกจากนี้งานวิจัยของไชยนันท์ และคณะ [10] รายงานไว้ว่า คอนกรีตที่มีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบเปลือกไม้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน และใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสมพบว่า คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดได้คล้ายกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งถือเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการผลิตคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการใช่มวลรวมหยาบรีไซเคิลเป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังคงมีการศึกษายังไม่มากนัก และยังคงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องยกตัวอย่างเช่น ธีรพทุทธิ์ และคณะ [8] ที่มีการใช้วัสดุมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลในการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย และเถ้าแกลบเป็นวัสดุตั้งต้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อมีการใช้คอนกรีตรีไซเคิลสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบยั่งยืนที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนอิฐนันทน์ และคณะ [11] รายงานไว้ว่า การใช้เศษคอนกรีตและเศษคอนกรีตบดลือกในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทำให้สมบัติด้านกำลังอัด อัตราการดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ปริมาณโพรง และความเร็วคลื่นความถี่สูงที่วิ่งผ่านตัวอย่างมีแนวโน้มใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีการใช้หินฝุ่น ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์และเศษวัสดุให้มีความหลากหลายยิ่งขึ้น นอกจากนั้น Zetang และคณะ [12] และ Sata และคณะ [13] ได้ดำเนินการศึกษาการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้

มวลรวมหยาบรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบมีคุณสมบัติเชิงกลเทียบเคียงกับการใช้มวลรวมธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบ

จากภาพรวมของงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าปริมาณเหลือทิ้งของคอนกรีตเก่ายังคงต้องได้รับการแก้ไข และควรได้รับการพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างอย่างจริงจัง โดยสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตที่มีการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากคอนกรีตเก่าควรได้รับการศึกษา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษา และพัฒนาการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติเพื่อผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติ โดยศึกษาในประเด็นของผลของปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบต่อระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัด มอดุลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมเชิงกลของการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน และประกอบการพิจารณาการใช้งานต่อไปในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติ

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ประกอบด้วย เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สารละลายต่างประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) (13.89% Na₂O, 32.15% SiO₂ และ 53.96% H₂O) ส่วนวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตปกติ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) สำหรับมวลรวมละเอียดทั้งระบบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติใช้มวลรวมละเอียด (RS) จากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยเป็นมวลรวมหยาบธรรมชาติ (CA) ขนาด 3/8 นิ้ว และมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) ขนาด 3/8 นิ้ว เป็นคอนกรีตเก่าจากการรื้อถอนพื้นคอนกรีตของอาคาร ซึ่งมีกำลังอัดของคอนกรีตอยู่ระหว่างเท่ากับ 35–45 เมกะปาสคาลโดยมวลรวมละเอียดและมวลรวม

หยาบธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ส่วนมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะถูกแช่น้ำก่อนดำเนินการผสมตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งคุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

Types of Aggregate	Specific Gravity (S _g)	Fineness Modulus (FM)	Water Absorption (%)
Fine Aggregate (RS)	2.63	2.40	0.80
Coarse Aggregate (CA)	2.71	6.00	1.72
Recycled Concrete Aggregate (RCA)	2.38	5.98	8.96

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีองค์ประกอบของ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นหลัก ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบของ SiO₂ และ CaO เป็นหลัก นอกจากนี้เถ้าลอยแคลเซียมสูงมีความละเอียดทดสอบตามวิธีของเบลน (Blaine Fineness) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4,300 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และ 15.5 ไมครอนตามลำดับ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความละเอียดทดสอบตามวิธีของเบลนเท่ากับ 3,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15.0 ไมครอน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical Compositions	FA (%)	PC (%)
SiO ₂	36.93	20.80
Al ₂ O ₃	18.10	4.70
Fe ₂ O ₃	11.91	3.40
CaO	21.41	65.30
MgO	2.78	1.50
Na ₂ O	2.28	0.40
K ₂ O	1.42	0.10
SO ₃	2.90	2.70
P ₂ O ₅	0.18	-
TiO ₂	0.55	-
LOI	1.54	0.90



ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีการออกแบบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 30 เมกะปาสคาล

Mix ID.	Materials (kg/m ³)						
	FA	CA	RCA	RS	10M NH	NS	SP
GPC0%RCA	470	1164	-	477	117.5	117.5	1
GPC20%RCA	470	931	233	477	117.5	117.5	1
GPC40%RCA	470	698	466	477	117.5	117.5	1
GPC60%RCA	470	466	698	477	117.5	117.5	1
GPC80%RCA	470	233	931	477	117.5	117.5	1
GPC100%RCA	470	-	1164	477	117.5	117.5	1

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตปกติที่มีการออกแบบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 30 เมกะปาสคาล

Mix ID.	Materials (kg/m ³)					
	PC	CA	RCA	RS	Tap water	SP
NC0%RCA	409	741	-	906	225	-
NC20%RCA	409	592	148	906	225	0.20
NC40%RCA	409	444	296	906	225	0.40
NC60%RCA	409	296	444	906	225	0.50
NC80%RCA	409	148	592	906	225	0.50
NC100%RCA	409	-	741	906	225	0.55

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยออกแบบกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 30 เมกะปาสคาล ซึ่งวิธีการออกแบบส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรายงานวิจัยของ Phoo-ngernkham และคณะ [14] จากการออกแบบส่วนผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 ทุกอัตราส่วนผสมสำหรับการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเริ่มต้นด้วยผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง มวลรวมหยาบ และมวลรวมหยาบ

รีไซเคิล จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) และสารลดน้ำพิเศษ (SP) ที่เตรียมไว้แล้วผสมให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นใส่ทรายที่เตรียมไว้แล้วผสมให้ส่วนผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 1 นาที สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีตปกติ ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยคอนกรีตปกติถูกออกแบบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 30 เมกะปาสคาล ตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [15] และควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 100 ± 25 มิลลิเมตร สำหรับกระบวนการผสมทั้งระบบจีโอพอลิเมอร์และซีเมนต์ปกติ จะใช้ไม่มาตรฐานในการดำเนินการผสม

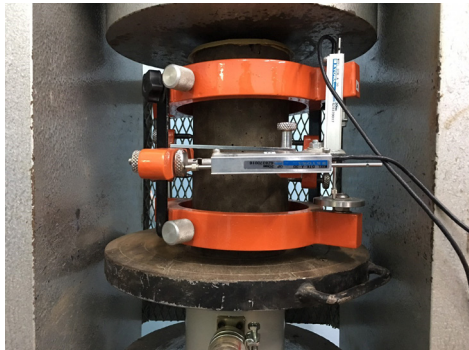
โดยทั้งระบบของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติจะดำเนินการแปรผันปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติ ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก

2.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

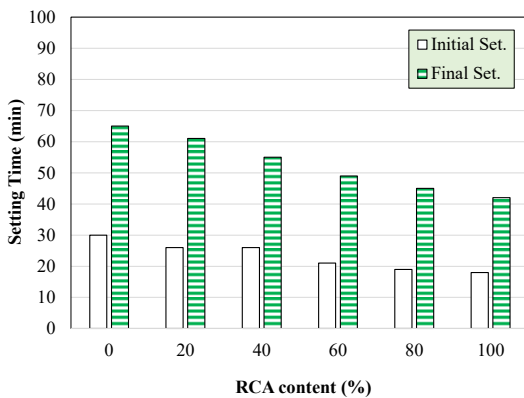
ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและปลาย ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403/C403M-16 [16]

2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด มอดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซอง

หลังจากการผสมดำเนินการเทส่วนผสมที่ได้ลงในภาชนะที่เตรียมไว้หลังจากนั้นบรรจุลงแบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร โดยแบ่งคอนกรีตตออกเป็นสามชั้นเท่าๆ กัน โดยแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง จำนวน 25 ครั้ง หลังจากนั้นทำการหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นดำเนินการถอดแบบ และเคลือบหัวและท้ายของตัวอย่างด้วยกัมมะถัน เพื่อให้ผิวหน้าก่อนตัวอย่างเรียบเสมอกันได้ระนาบ โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบมอดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับการหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต



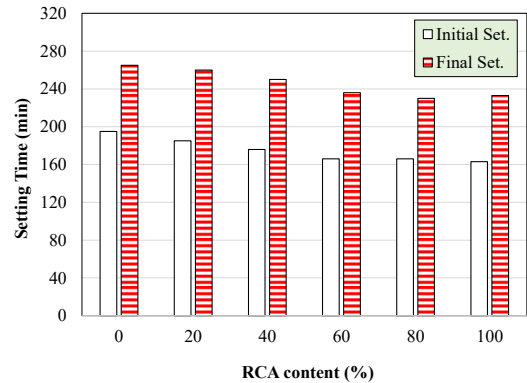
รูปที่ 2 ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ASTM C39/C39M-17 [17] ส่วนการวิเคราะห์หาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C469 [18]

3. ผลการทดลอง

3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ค่าระยะเวลาการก่อตัวต้น และระยะเวลาการก่อตัวปลายของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติที่มีการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 จากรูปที่ 2 พบว่า ค่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อส่วนผสมมีการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งในระบบของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



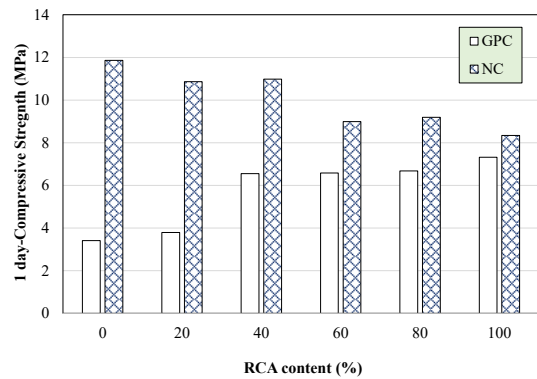
รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตปกติ

และระบบคอนกรีตปกติ โดยในระบบเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 30, 26, 26, 21, 19 และ 18 นาที และระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 65, 61, 55, 49, 45 และ 42 นาที สำหรับปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การที่ค่าระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าดูดน้ำมากกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติส่งผลให้เมื่อแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสมจะสามารถดูดน้ำเข้าสู่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลได้มากขึ้นจึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง นอกจากนี้เนื่องจากผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์ติดอยู่รอบๆ ซึ่งมีสารประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) [19] ซึ่งโดยปกติในระบบของแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์แคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) [4] จึงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์ [20], [21]

สำหรับระบบของคอนกรีตปกติ (รูปที่ 3) พบว่า ค่าระยะเวลาก่อตัวต้นเท่ากับ 195, 185, 176, 166, 166 และ 163 นาที และค่าระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 265, 260, 250, 236, 230 และ 233 นาที สำหรับปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกับระยะเวลาก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของระยะเวลาการก่อตัวพบว่า ระบบของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงมากกว่าระบบของคอนกรีตปกติ อาจเนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาระหว่างเพสต์กับมวลรวมหยาบรีไซเคิลของระบบของจีโอพอลิเมอร์แตกต่างกับระบบของซีเมนต์ปกติ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Phoo-ngernkham และคณะ [22] ที่ได้รายงานเกี่ยวกับการทำปฏิกิริยาที่จุดสัมผัสระหว่างคอนกรีตเดิมกับจีโอพอลิเมอร์ไว้ว่าสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่บริเวณผิวคอนกรีตเก่าสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมซิลิเกตเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถยึดประสานระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดได้มากขึ้น

3.2 กำลังอัด

ค่ากำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4 ในงานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่มเท่ากับ 1 วัน ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 30 เมกะปาสคาล เนื่องด้วยผู้วิจัยต้องการทราบคุณสมบัติเชิงกลเบื้องต้นเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงในขั้นตอนต่อไป จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ค่ากำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติเมื่อมีการใช้มวลรวม



รูปที่ 4 กำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติที่อายุการบ่มเท่ากับ 1 วัน

หยาบรีไซเคิลในส่วนผสมมีแนวโน้มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4 พบว่า ค่ากำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเท่ากับ 3.41, 3.79, 6.55, 6.58, 6.68 และ 7.32 เมกะปาสคาล ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตปกติเท่ากับ 11.86, 10.86, 10.98, 8.99, 9.19 และ 8.34 เมกะปาสคาล สำหรับปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาและวิเคราะห์ผลการทดสอบข้างต้นพบว่า กำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติเนื่องจากพื้นผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) [19] และสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงและซิลิกาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) [4] ทำให้มีการพัฒนาการเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์ภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมากขึ้น นอกจากนั้นเนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าการดูดน้ำมากกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติส่งผลให้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานลดลงทำนองเดียวกันกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานของระบบซีเมนต์ปกติ ดังนั้นกำลังอัดของแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจึงมีการพัฒนากำลังอัดมากขึ้นตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มากขึ้น ส่วนการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตปกติเมื่อแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิล อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของมวลรวมหยาบรีไซเคิลทำให้ระบบมีปริมาตรของมวลรวมหยาบเพิ่มขึ้น และความแข็งของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีค่าน้อยกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ [23]

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของการพัฒนากำลังอัดระหว่างแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติแสดงให้เห็นว่า การทำปฏิกิริยาของระบบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา และแคลเซียมออกไซด์ และเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ส่วนระบบของคอนกรีตปกติจะมีปริมาณของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH₂)) ที่พื้นผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลในปริมาณสูง ซึ่งการพบสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH₂)) จะส่งผลเสียต่อการพัฒนากำลังอัดในอายุปลายของคอนกรีต ยกเว้นกรณีที่มีการใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสม อีกทั้งยังมีโอกาสเกิดเป็นปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในระยะต่อมา [24]

3.3 มอดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติที่มีการแทนที่มวลรวมรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติ ดังแสดงในตารางที่ 5 ส่วนอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 6

จากตารางที่ 5 พบว่า ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลจนถึงร้อยละ 60 หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 4) ส่วนค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุด (Strain at Peak Stress) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น เมื่อ

ตารางที่ 5 มอดูลัสยืดหยุ่นของแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติ

RCA Content (%)	GPC		NC	
	Modulus of Elasticity (GPa)	Strain at Peak Stress (mm/mm)	Modulus of Elasticity (GPa)	Strain at Peak Stress (mm/mm)
0	1.06	0.00295	5.25	0.00164
20	1.73	0.00282	5.23	0.00258
40	2.67	0.00216	4.39	0.00246
60	2.95	0.00241	3.80	0.00223
80	1.85	0.00383	2.19	0.00417
100	1.81	0.00402	2.06	0.00410

ตารางที่ 6 อัตราส่วนปัวซองของแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติ

RCA content (%)	Poisson's Ratio	
	GPC	NC
0	0.19	0.18
20	0.19	0.18
40	0.18	0.17
60	0.16	0.15
80	0.18	0.15
100	0.13	0.12

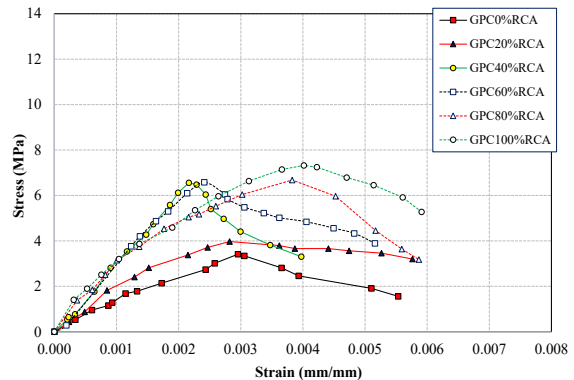
พิจารณาการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลร้อยละ 80-100 สำหรับการผลิตแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพบว่า ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแฉ่ำลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและความชันของกราฟมีแนวโน้มลดลง

สำหรับค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด (ดูรูปที่ 4) อาจเนื่องจากความแข็งแรงของมวลรวมหยาบรีไซเคิลน้อยกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ และมีแรงเสียดทาน (Friction Force) ภายในระบบคอนกรีตปกติต่ำเมื่อมีการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น [23] ซึ่งในประเด็นนี้จะแตกต่างกับระบบ

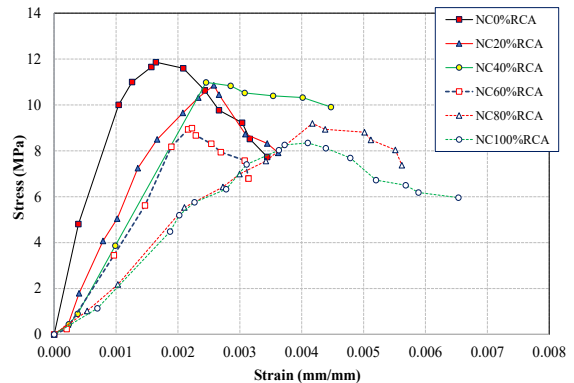
ของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เนื่องจากระบบของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีความแข็งแรงมากขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มากขึ้นดังที่ได้อธิบายไว้ในผลการทดสอบกำลังอัด นอกจากนี้ค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นเป็นเหตุผลที่ส่งผลให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลง

จากตารางที่ 6 พบว่า อัตราส่วนปัวซงของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าระหว่าง 0.13–0.19 ส่วนอัตราส่วนปัวซงของคอนกรีตปกติมีค่าระหว่าง 0.12–0.18 จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนปัวซงของทั้งระบบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาแนวทางการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปัวซงของคอนกรีต คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแวนอนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแนวตั้งตั้งรายละเอียดในมาตรฐาน ASTM C469 [18] ดังนั้นเมื่อมีการใช้มวลรวมรีไซเคิลเพิ่มขึ้นจะมีค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุดมากขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนปัวซงของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซงของงานวิจัยนี้ร่วมกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติของงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Phoo-ngernkham และคณะ [14] และ Cook และ Chindaprasirt [25] เนื่องจากงานวิจัยนี้ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการบ่มเท่ากับ 1 วัน ส่วนงานวิจัยที่ผ่านมาทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยค่ามอดุลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซงของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าระหว่าง 20–30 จิกะปาสกาล และ 0.20–0.31 ตามลำดับ [14] ส่วนคอนกรีตปกติมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซงที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าระหว่าง 25–35 จิกะปาสกาล และ 0.11–0.21 ตามลำดับ [25], [26]



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตปกติ

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 5 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตปกติดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของระบบเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงและความเครียดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในมวลรวมหยาบธรรมชาติ เมื่อพิจารณารูปที่ 5 พบว่า

ปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลร้อยละ 40-60 มีความแข็งแรงมากที่สุด ส่วนปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลมากกว่าร้อยละ 60 มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มมากขึ้น ซึ่งการที่คอนกรีตมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสมแสดงถึงคอนกรีตมีความเหนียวในแกน (Axial Ductility) สูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการให้คอนกรีตมีความเหนียวในแนวแกน และมีพฤติกรรมการวิบัติแบบไม่ทันที่ทันใด ขณะที่ปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลต่ำกว่าร้อยละ 40 พบว่า มีค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด ซึ่งผลการทดสอบทั้งหมดสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตปกติพบว่า ความชันหรือความแรงของคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มมากขึ้นตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยลักษณะเส้นกราฟคล้ายพาราโบลาคว่ำคล้ายกับคอนกรีตทั่วไป และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยพฤติกรรมการรับกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงเริ่มต้นมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่คอนกรีตรับแรงกดอัดได้ประมาณร้อยละ 40-70 ของกำลังอัดประลัย จากนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดมีลักษณะที่โค้งมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติ [4]

4. สรุป

จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาการก่อตัวปลายของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตอยู่ระหว่าง 42-65 นาที ส่วนระยะเวลาการก่อตัวปลายของคอนกรีตปกติอยู่ระหว่าง 233-265 นาที

2) กำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่มวลรวม

หยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตปกติมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล อาจเนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบจากปฏิกิริยาไฮเดรชันบริเวณพื้นผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากเศษคอนกรีตกับซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับระบบจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มมากกว่าระบบของคอนกรีตปกติซึ่งจะมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินในปริมาณสูงส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากเศษคอนกรีตกับมอร์ตาร์ภายในคอนกรีต

3) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตปกติมีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ส่วนอัตราส่วนปริมาตรของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเครียดอัดที่จุดความเค้นสูงสุดเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีแนวโน้มมากขึ้นตามปริมาณการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบรายได้จากสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี สัญญาเลขที่ 001/2563 และงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยหน่วยงานบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคนและทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม เลขที่สัญญา B05F630106 สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] L. K. Turner and F. G. Collins, "Carbon dioxide



- equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC cement concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 125–130, 2013.
- [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] 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).
- [5] K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Detphan, C. Detphan, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt, “Properties of pervious geopolimer concrete made from high-calcium fly ash containing calcium carbide residue,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 2, pp. 280–290, 2020 (in Thai).
- [6] C. Detphan, S. Detphan, K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt, “Mechanical properties of high-calcium fly ash geopolimer with nano-SiO₂ particle sizes,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, 2021 (in Thai).
- [7] 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 geopolimer,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, 2021 (in Thai).
- [8] T. Poltue, A. Suddepong, and S. Horpibulsuk, “Strength of recycled concrete aggregate binding with fly ash-rice husk ash geopolimer for pavement sub bases application,” *KMUTT Research and Development*, vol. 40, no. 4, pp. 567–581, 2017 (in Thai).
- [9] T. Saisut, “Recycled coarse aggregate by residual concrete pile,” in *Proceedings of the 9th Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Conference*, 2011, pp. 1725–1735 (in Thai).
- [10] C. Rattanashotinunt, N. Makaratat, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and K. Manuttananuiul, “Properties of concrete made from industrial wastes containing calcium carbide residue palm oil fuel ash rice husk-bark ash and recycled aggregates,” *The Industrial Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 37–52, 2016 (in Thai).
- [11] A. Siriwattanakarn, A. Wongsa, V. Sata, and P. Chindapasirt, “Pressed geopolimer concrete containing recycle aggregates,” presented at the 23th National convention on Civil Engineering, Nakhon Nayok, Thailand, 2017 (in Thai).
- [12] Y. Zaetang, V. Sata, A. Wongsa, and P. Chindapasirt, “Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 111, pp. 15–21, 2016.
- [13] V. Sata, A. Wongsa, and P. Chindapasirt,

- “Properties of pervious geopolymers concrete using recycled aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 33–39, 2013.
- [14] T. Phoo-ngernkham, C. Phiangphimai, N. Damrongwiriyanupap, S. Hanjitsuwan, J. Thumrongvut, and P. Chindapasirt, “A mix design procedure for alkali-activated high-calcium fly ash concrete cured at ambient temperature,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, pp. 1–13, 2018.
- [15] *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, American Concrete Institute ACI 211.1-91, 1991.
- [16] *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*, Annual Book of ASTM Standard C403/C403M-16, 2016.
- [17] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, Annual Book of ASTM Standard C39/C39M-17, 2017.
- [18] *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression*, Annual Book of ASTM Standard C469, 2002.
- [19] 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.
- [20] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham, and N. Damrongwiriyanupap, “Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer,” *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 128–134, 2017.
- [21] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindapasirt, “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.
- [22] T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, L.Y. Li, N. Damrongwiriyanupap, and P. Chindapasirt, “Adhesion characterization of portland cement concrete and alkali-activated binders under different types of calcium promoters,” *Advances in Cement Research*, vol. 31, no. 2, pp. 69–79, 2019.
- [23] R. Somna, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and P. Rattanachu, “Effect of the water to binder ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 16–22, 2012.
- [24] W. Kroehong, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, “Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 11, pp. 4095–4104, 2011.
- [25] D. J. Cook and P. Chindapasirt, “A mathematical model for the prediction of damage in concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 11, no. 4, pp. 581–90, 1981.
- [26] M. Shariq, J. Prasad, and H. Abbas, “Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 411–418, 2013.