Research article

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และวิจัยประยุกต์
Journal of Engineering and Applied Research
1(1), 10-19

การศึกษากำลังอัดและความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

A Study of Compressive Strength and Density of Pervious Geopolymer Concrete

อาร์มีน ยูโซ๊ะ[1] นัสมี มะเด็ง[1] นุรอาซีกิน มูดอ[1*]
ตักวา ยูโซ๊ะ[1] นูซีลา ยือเร๊าะ[1] และ มุสลิม กอเมาะ[1]

[1]หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ อำเภอเมืองนราธิวาส จังหวัดนราธิวาส 96000

รับบทความ 12 พฤษภาคม 2565
แก้ไขบทความ 9 สิงหาคม 2565
ตอบรับบทความ 16 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.75, 1 และ 1.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.3 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อหินเท่ากับ 1:8, 1:10, 1:12, 1:14 และ 1:16 โดยน้ำหนัก โดยทำการเปรียบเทียบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่บ่มอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน กับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดคอนกรีตพรุนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวประสานในปริมาณเท่ากับน้ำหนักของเถ้าลอยรวมกับน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์รวมกัน จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่บ่มร้อนมีค่าต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนบ่มอากาศ กำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายในส่วนผสม โดยที่อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.75 เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ส่วนกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : กำลังอัด; คอนกรีตพรุน; ความหนาแน่น; จีโอพอลิเมอร์

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน E-mail : 6260500066@pnu.ac.th*

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และวิจัยประยุกต์
Journal of Engineering and Applied Research
Research article
1(1), 10-19

การศึกษากำลังอัดและความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

A Study of Compressive Strength and Density of Pervious Geopolymer Concrete

Ameen Yusoh[1] Nasmee Madeng[1] Nur-asikeen Mudor[1*]
Takwa Yusoh[1] Nusila Yueroh[1] and Muslim Komoh[1]

[1]Infrastructur and Materials Innovation Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Amphoe Mueang, Narathiwat Province 96000

Received 12 May 2022
Revised 9 August 2022
Accepted 16 August 2022

Abstract

This research aims to study the compressive strength of geopolymer pervious concrete. The mix proportions were prepared with alkali solution to fly ash (AS/FA) ratios of 0.75, 1 and 1.25 by weight. The water to fly ash (W/FA) ratios of 0.3 and fly ash to stone (FA/ST) ratios of 1:8, 1:10, 1:12, 1:14 and 1:16 by weight. Testing the compressive strength of geopolymer pervious concrete were cured for a period of 28 days at ambient temperature compared to geopolymer pervious concrete were curing temperature at 80 ℃ for 1 hour. Further testing the compressive strength of pervious concrete were use Portland cement equal to the weight amount of fly ash and alkali solution combined. The results revealed that the compressive strength of specimens were cured in oven was lower than that of specimens were cured at ambient temperature. Compressive strength and bulk density of geopolymer pervious concrete tends to increase with increase of fly ash. However compressive strength are decreased when increased amount of alkali solution in the mix. (AS/FA) ratio of 0.75 gave the highest compressive strength. Compressive strength and bulk density of pervious concrete tends to increase with increase Portland cement replacement.

keyword : Compressive strength; Pervious concrete; Bulk density; Geopolymer

** Corresponding author E-mail : 6260500066@pnu.ac.th*

1. บทนำ

คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่มีรูพรุนหรือโพรงเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ส่งผลให้ของเหลวหรือก๊าซสามารถไหลผ่านได้ในปริมาณมากและจากสมบัติทางกายภาพดังกล่าว ทำให้คอนกรีตพรุนมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตปกติทั่วไป โดยทั่วไปคอนกรีตพรุนมีส่วนผสมเป็นมวลรวมหยาบและซีเมนต์เพสต์จะไม่มีมวลรวมละเอียดหรือมีปริมาณน้อยมาก ด้วยเหตุนี้ทำให้คอนกรีตพรุนสามารถรับแรงอัดได้น้อยกว่าคอนกรีตปกติ คอนกรีตพรุนมีหน้าที่หลักในการส่งผ่านน้ำจากด้านบนลงไปด้านล้างเพื่อเป็นการระบายน้ำออกจากผิวบน ในก้อนคอนกรีตพรุนจะประกอบไปด้วย 1) มวลรวมหยาบหรือหินสามารถใช้หลายขนาดรวมกัน (open grade) หรือใช้หินขนาดเดียว (single grade) 2) ซีเมนต์เพสต์ และ 3) ช่องว่างหรือโพรง อัตราการไหลผ่านของน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่าง กล่าวคือช่องว่างมากทำให้อัตราการไหลสูง อย่างไรก็ตามการที่คอนกรีตพรุนมีปริมาณช่องว่างมากขึ้นจะส่งผลให้สามารถรับแรงอัดได้น้อยลง

การใช้วัสดุประสานนอกเหนือจากปูนซีเมนต์กำลังได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น และหนึ่งในนั้นเป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งอย่างเช่น เถ้าลอยนำมาผสมเข้าโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำให้สามารถใช้เป็นวัสดุประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ Sata และคณะ [1] ได้มีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนโดยใช้เถ้าลอย และใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเหลือทิ้ง เศษอิฐมอญ และหินธรรมชาติ มาทดสอบด้านกำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก ช่องว่าง และซึมผ่านของน้ำ ใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อมวลรวม 1:8 โดยน้ำหนัก บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชม. จากการศึกษาพบว่าการใช้หินธรรมชาติให้กำลังอัดได้ดีที่สุดประมาณ 119-136 กก./ซม.^{2} แต่มวลรวมจากเศษอิฐมอญให้ค่ากำลังอัดต่ำอยู่ในช่วง 29.6-67.3 กก./ซม.^{2} Zaetang และคณะ [2] ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากมวลรวมเถ้าหนักในอัตราส่วนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 3.67 : 1 โดยน้ำหนัก มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 48 ชม. จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 60.2-78.5 กก./ซม.^{2} ความหนาแน่น 1,466-1,496 กก./ม.^{3} การศึกษาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้ดินขาวเผาและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุประสานโดย Sun และคณะ [3] สามารถให้ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 115.2-284.5 กก./ซม.^{2} เมื่อใช้อัตราส่วนดินขาวเผาหรือตะกรันเหล็กต่อหินเท่ากับ 1:8 โดยน้ำหนัก และใช้หิน 3 ขนาด 2-4, 4-8 และ 8-16 มม. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้หินที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดลดลง และยังทำให้ความหนาแน่นลดลงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามจะมีผลทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีโพรงหรือช่องว่างเพิ่มมากขึ้นเมื่อหินมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการซึมผ่านของน้ำมากขึ้นตามไปด้วย

ซึ่งที่ผ่านมาส่วนใหญ่การศึกษาจะใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 1:8 โดยน้ำหนัก หรือน้อยกว่า แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการใช้อัตราส่วนวัสดุประสานเถ้าลอยต่อมวลรวมหยาบ 1:8 ถึง 1:16 โดยน้ำหนัก เพื่อให้เกิดช่องว่างมากขึ้นมีผลต่อการระบายน้ำ พร้อมทั้งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย และลักษณะการบ่ม พร้อมกับการเปรียบเทียบกับคอนกรีตพรุนที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ ศึกษาทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพื่อประยุกต์ใช้ในงานปูพื้นที่รับน้ำหนักไม่มาก

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ตามมาตรฐาน ASTM C150 [4]

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี [5] ซึ่งมี SiO_2+Al_2O_3+ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 67.44 และมี CaO ร้อยละ 16.75 มีอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน ร้อยละ 82

มวลรวมหยาบเป็นหินธรรมชาติขนาด 3/8 นิ้ว

สารละลายอัลคาไลน์ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเกล็ดมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีองค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 14.85 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ

29.45 และน้ำร้อยละ 55.70 โดยน้ำหนัก โดยสารละลายทั้งสองละลายเข้ากับน้ำ

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนโดยใช้เถ้าลอยดังแสดงใน Table 1 ใช้อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1:2.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.3 ตลอดการศึกษานี้ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายที่ 1:1.25 , 1:1 และ 1:0.75 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยต่อหินเท่ากับ 1:8, 1:10, 1:12, 1:14 และ 1:16 โดยน้ำหนัก เตรียมตัวอย่างเริ่มจากการการผสมโซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นเทสารละลายเข้ากับเถ้าลอยผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปผสมเข้ากับหินที่เตรียมเอาไว้ ผสมให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์ให้เข้ากันอย่างทั่วถึง โดยให้มีการเคลือบผิวหินอย่างสม่ำเสมอ สังเกตจากจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เป็นสีน้ำตาลจะเข้าไปเคลือบหินที่เป็นสีเทา หากทำการผสมแล้วยังปรากฏเป็นสีเทาที่บริเวณผิวหินแสดงว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์ยังเคลือบไม่ทั่วถึง จากนั้นเทลงแบบหล่อขนาด 15x15x15 ซม. ตั้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. แล้วทำการแกะแบบหล่อ ต่อด้วยบ่มอากาศที่อายุ 28 วัน กรณีตัวอย่างที่ใช้การบ่มร้อน 1 ชม. หลังจากเทจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเข้าแบบหล่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 24 ชม. แกะแบบหล่อแล้วหุ้มด้วยพลาสติกทั้งก้อนเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำเข้าอบเป็นเวลา 1 ชม.

2.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน BS EN 12390-1 [6] BS EN 12390-2 [7] และ BS EN 12390-3 [8] ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ใช้ตัวอย่างขนาด 15x15x15 ซม. ทดสอบอัตราส่วนละ 3 ก้อน ก่อนทดสอบกำลังรับแรงอัดได้มีการทดสอบความหนาแน่น โดยการวัดขนาดก้อนตัวอย่างทั้ง 3 มิติ และทำการชั่งน้ำหนัก คำนวณความหนาแน่นตามสมการ (1)

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad (1)$$

ρ = ความหนาแน่น (กก./ม.^{3})
M = น้ำหนัก (กก.)
V = ปริมาตร (ม.^{3})

Figure 1 Heat curing of samples

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

จากผลการทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อหินเท่ากับ 1:8, 1:10, 1:12, 1:14 และ 1:16 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 1.25:1, 1:1 และ 0.75:1 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ในการบ่มอากาศ และบ่มอากาศรวมกับบ่มร้อน 1 ชม. ดัง Figure 2-4 จากการผลการทดสอบพบว่าการใช้อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ 0.75 สามารถให้กำลังได้ดีที่สุด ทั้งการบ่มอากาศอย่างเดียวและใช้การบ่มร้อนประกอบ เมื่อพิจารณา Figure 3 เมื่อมีการบ่มร้อนหลังจากบ่มอากาศ 24 ชม. พบว่าทั้งที่อัตราส่วนอัลคาไลน์เท่ากับ 1.25, 1 และ 0.75 การเพิ่มปริมาณของหินมีแนวโน้มที่จะทำให้กำลังอัดลดลง เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการศึกษาของ มงคล [9] ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนมวลรวมมากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตพรุนลดลง เนื่องปริมาณเพสต์น้อยลงทำให้ไม่เพียงพอต่อการเคลือบผิวมวลรวม ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้การเพิ่มปริมาณหินจะทำให้ปริมาณของเถ้าลอยในสถานะที่เป็นจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีสัดส่วนที่น้อย การเคลือบผิวหินไม่ทั่วถึงและปริมาณของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างหินลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลง โดยเกี่ยวเนื่องกับการยึดเกาะระหว่างหินหรือมวลรวม กล่าวคือเมื่อปริมาณเพสต์มากพื้นที่การยึดเกาะระหว่างหินก็จะมากขึ้นตามไปด้วยและจะส่งผลต่อกำลังอัดที่ดีขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตหรือจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะมาหรือน้อย

Table 1 Mix proportion of pervious geopolymer concrete (by weight)

ส่วนผสม	สารอัลคาไลน์	เถ้าลอย	หิน	น้ำต่อเถ้าลอย	บ่มอากาศ (ชม.)
		1			
		1	8	0.3	24
		1			
4	1.25	1			
5	1	1	10	0.3	24
6	0.75	1			
7	1.25	1			
8	1	1	12	0.3	24
9	0.75	1			
10	1.25	1			
11	1	1	14	0.3	24
12	0.75	1			
13	1.25	1			
14	1	1	16	0.3	24
15	0.75	1			
16	1.25	1			
17	1	1	12	0.3	24+1 (บ่มร้อน)
18	0.75	1			
19	1.25	1			
20	1	1	14	0.3	24+1 (บ่มร้อน)
21	0.75	1			
22	1.25	1			
23	1	1	16	0.3	24+1 (บ่มร้อน)
24	0.75	1			
	ปูนซีเมนต์		หิน	น้ำต่อปูนซีเมนต์	บ่มอากาศ
25	2.25				
26	2		8	0.3	24
27	1.75				
28	2.25				
29	2		10	0.3	24
30	1.75				
31	2.25				
32	2		12	0.3	24
33	1.75				

ขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลัก 1) ความแข็งแรงของมวลรวม 2) กำลังของซีเมนต์เพสต์ และ 3) ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการศึกษาของ Abdulsalam Arafa และคณะ [10] ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 1:6, 1:7, 1:7.5, 1:8 และ 1:9 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มอย่างชัดเจนว่าการใช้มวลรวมหยาบมากขึ้นมีผลให้กำลังอัดอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงเนื่องจากทำให้มีรูโพรงมากขึ้น การใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 1:9 ให้กำลังอัด 88.7 กก./ซม.^{2} โดยใช้การบ่มร้อน 80 องศาเซลเซียส 24 ชม.

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย พบว่าการใช้อัตราส่วนอัลคาไลน์ลดลงจาก 1.25 ถึง 0.75 กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกอัตราส่วนผสมเถ้าลอยต่อหิน และโดยเฉพาะที่ 0.75 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นความเหมาะ

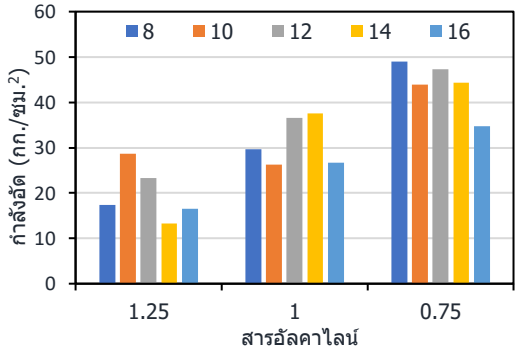

Figure 2 Compressive strength of pervious geopolymer concrete

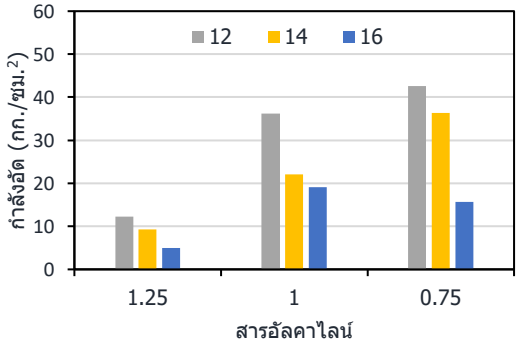

Figure 3 Compressive strength of pervious geopolymer concrete, heat curing 1 h.

สมของปริมาณสารอัลคาไลน์ที่ 0.75 สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด ในขณะที่อัตราส่วนอัลคาไลน์ 1 และ 1.25 กำลังลดลงตามลำดับ และเป็นที่น่าสังเกตว่าตัวอย่างที่อัตราส่วนทั้ง 2 นั้น ที่อายุบ่มอุณหภูมิห้องตัวอย่างจะเกิดขี้เกลือที่ขาวดัง Figure 4 ที่บริเวณผิวก้อนตัวอย่าง ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการเกิดขี้เกลือสีขาวนั้นเกิดจากการปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ทำให้มีสารละลายเหลือและเมื่อเจออากาศภายนอกเกิดปฏิกิริยาเป็นขี้เกลือ ขี้เกลือที่เกิดขึ้นมีผลด้านลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และจากผลการทดสอบของ Temuujin และคณะ [11], Williams และ Van Riessen [12], Huang และคณะ [13] พบว่าขี้เกลือที่เกิดขึ้นในจีโอพอลิเมอร์นั้นเป็นอันตรายต่อสมบัติทางกลและความทนทานต่อจีโอพอลิเมอร์ Xie และ Ozbakkaloglu [14] กล่าวว่าขี้เกลือที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากสารละลายที่ตกค้างไปสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ โดยกลไกการเกิดขี้เกลือสามารถแสดงดังสมการที่ (1) และ (2)

$$CO_2(g) + 2OH^-(aq) \rightarrow CO_3^{2-}(aq) + H_2O \quad (1)$$

$$2Na^+(aq) + CO_3^{2-}(aq) + 7H_2O \rightarrow Na_2CO_3 \cdot 7H_2O(s) \quad (2)$$

ในส่วนของตัวอย่างที่มีการบ่มร้อน 1 ชม. ในตู้อบนั้น ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อหินเท่ากับ 1:12, 1:14 และ 1:16 โดยน้ำหนัก อิทธิพลจากอัตราส่วน เถ้าลอยต่อหินและอิทธิพลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย ดัง Figure 5 ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบ่มร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบ่มร้อนกับตัวอย่างที่ผ่านการบ่มร้อน พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการบ่มร้อนมีค่ากำลังอัดน้อยกว่าที่ไม่ผ่านการบ่มร้อนทุกอัตราส่วนผสมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งโดยปกติทั่วไปความร้อนสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ได้ดี ถึงแม้จะเป็นการบ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 ชม. ก็ตาม แต่เป็นที่น่าสังเกตการบ่มร้อนจากงานวิจัยที่ผ่านมา เป็นการบ่มร้อนหลังการเทแบบหล่อแล้วหุ้มด้วยพลาสติกไม่ว่าจะเป็นจีโอพอลิเมอร์เพสต์ มอร์ต้าร์ หรือคอนกรีตโดยทันที แต่การศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการบ่มที่อุณหภูมิห้องในแบบหล่อ 24 ชม. ก่อนนำเข้าบ่มร้อนในตู้อบ ด้วยขั้นตอนที่ทำการศึกษานี้อาจจะไม่เป็นผลดีเหมือน

Figure 4 Physical properties of pervious geopolymer concrete at 28 days (a) 1.25 (b) 1 and (c) 0.75

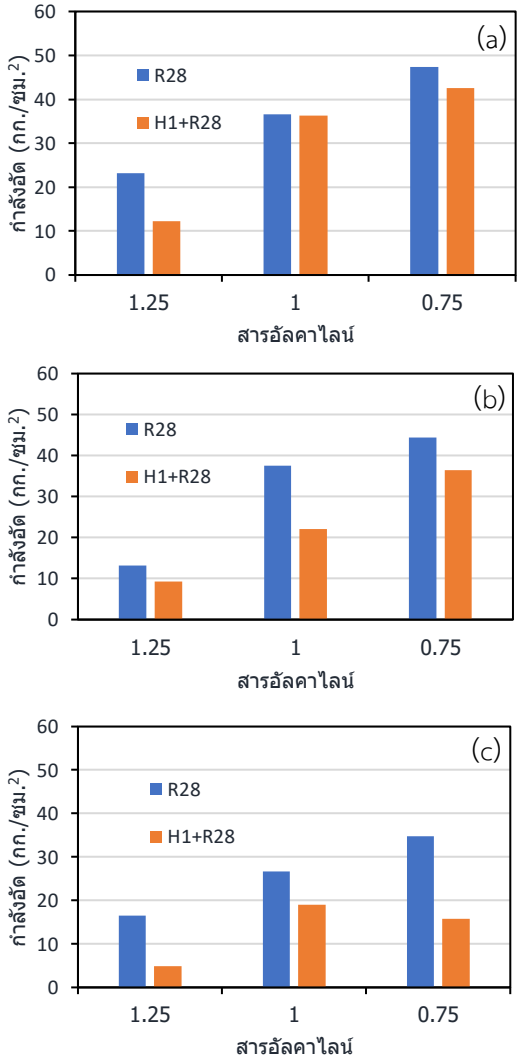

Figure 5 Compressive strength of pervious geopolymer concrete with difference curing (a) 1:12 (b) 1:14 and (c) 1:16

การบ่มร้อนในทันที ซึ่งการบ่มร้อนหลังจากบ่มอากาศ24 ชม. นั้น จีโอพอลิเมอร์มีการเซ็ตตัวไปแล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อยลง และยังส่งผลเสียจากการได้ความร้อนในช่วงที่จีโอพอลิเมอร์เพสต์แข็งตัวไปแล้ว

3.2 กำลังอัดของคอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุนใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์แทนการเชื่อมประสานด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณของเถ้าลอยรวมกับสารอัลคาไลน์ต่อหินโดยน้ำหนักดัง Table 1 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3

ตลอดการศึกษานี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นดัง Figure 6 พบว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากทำให้คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณน้อย เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงส่งผลให้ความสามารถในการเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมทำได้ดีขึ้นด้วยจากพื้นที่การยึดเกาะมากขึ้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณหิน หินที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์ลดลงจากการลดพื้นที่การยึดเกาะในขณะที่สารยึดเกาะเท่าเดิม ซึ่งจะมีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับการใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์ ถึงแม้มีการใช้ปริมาณสารอัลคาไลน์มากขึ้นก็ไม่ได้ยืนยันว่าสามารถทำปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นรวมอยู่ด้วย เช่น สัดส่วนเถ้าลอยต่อสารอัลคาไลน์ ซึ่งเป็นอิทธิพลที่สำคัญประการหนึ่งต่อความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ [15] แต่ในกรณีของปูนซีเมนต์เมื่อใช้ในปริมาณมากโอกาสที่จะให้กำลังอัดมักสูงตามไปด้วย

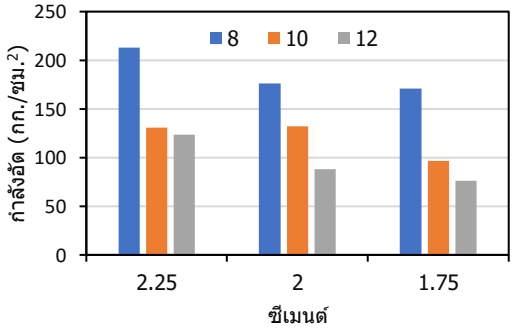

Figure 6 Compressive strength of pervious concrete

3.3 ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดัง Figure 7 พบว่าเมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยต่อหินมากขึ้น แนวโน้มความหนาแน่นลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากว่าการเพิ่มปริมาณหินในอีกนัยหนึ่งก็คือการลดปริมาณจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ซึ่งแน่นอนว่าการลดปริมาณซีเมนต์เพสต์จะส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากปริมาณซีเมนต์เพสต์ลดลงที่ปริมาตรเท่ากัน เช่นเดียวกันกับการลดอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย ความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 1,582-1,879 กก./ม.^{3} ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปกติและคอนกรีตพรุน (1,724-1,962 กก./ม.^{3}) เนื่องจากปริมาณช่องว่างหรือรูโพรงจำนวนมากจากการออก

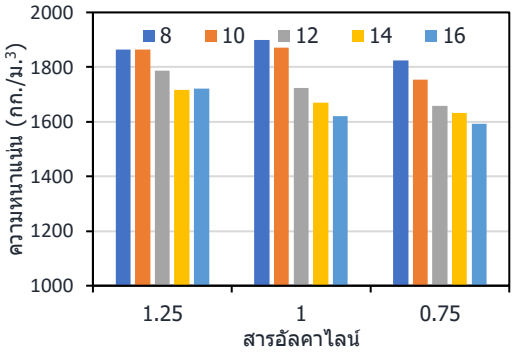

Figure 7 Bulk density of pervious geopolymer concrete

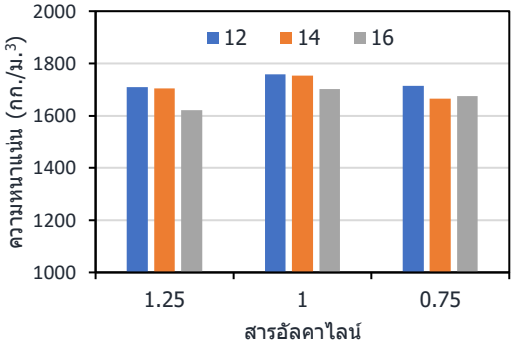

Figure 8 Bulk density of pervious geopolymer concrete, heat curing 1 h.

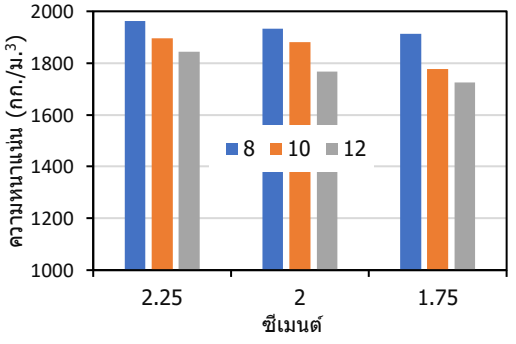

Figure 9 Bulk density of pervious concrete

แบบส่วนผสม เมื่อพิจารณาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ผ่านการบ่มร้อน 1 ชม. ดัง Figure 8 พบว่าค่าความหนาแน่นจากอิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อหินที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงเช่นเดียวกันกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ไม่ผ่านการบ่มร้อน แต่เมื่อพิจารณาถึง

อัตราส่วนของสารอัลคาไลน์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอัคลาไลน์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเล็กน้อย เป็นไปได้ว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์ในระบบเมื่อผ่านการบ่มร้อนจะทำให้น้ำมีการระเหยออกเนื่องจากความร้อนทั้งที่อยู่ในตู้อบ (น้ำระเหยออกติดอยู่ที่พลาสติกที่ใช้ห่อก้อนตัวอย่าง) และระเหยหลังจากแกะพลาสติกออก ปริมาณน้ำที่มากกว่าของตัวอย่างที่ใช้สารอัลคาไลน์มาก (โซเดียมซิลิเกตมากปริมาณน้ำมาก) ทำให้เมื่อน้ำในระบบระเหยออกปริมาณมากจากความร้อนส่งผลให้หลังจาก 28 วัน ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย Figure 9 แสดงค่าความหนาแน่นคอนกรีตพรุน ซึ่งค่าความหนาแน่นมีลักษณะเป็นไปในรูปแบบเดียวกันกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ไม่ผ่านการบ่มร้อน กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนของหินเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นก็จะลดลง และเช่นเดียวกันกับการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นความหนาแน่นมากขึ้นตาม ไปด้วย เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นในส่วนผสมส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่น

4. สรุป

จากการศึกษาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าลอย ทดสอบกำลังอัด และความหนาแน่น โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมต่าง ๆ จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเพิ่มอัตราส่วนของหินส่งผลให้กำลังอัดลดลงทั้งจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนและคอนกรีตพรุน

2. การใช้อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.75:1 สามารถให้กำลังอัดดีที่สุด

3. การบ่มร้อนหลังการบ่มอากาศส่งผลลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

4. การใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมากทำให้กำลังอัดและความหนาแน่นคอนกรีตพรุนสูงขึ้น

5. ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนลดลง เมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยลดลง และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อหินมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] V. Sata, A. Wongsa, and P. Chindaprasirt, “Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 33-39, 2013. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.046.

[2] Y. Zaetang, A. Wangsa, V. Sata, P. Chindaprasirt, “Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 289-295, 2015. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.076.

[3] Z. Sun, X. Lin, and A. Vollpracht, “Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers,” *Construction and Building Materials*, vol. 189, pp. 797-803, 2018. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.067.

[4] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM 150-4, 2004.

[5] A. Hawa, P. Salaemae, S. Mama, Z. Dema, and W. Prachasaree, “Mechanical properties and microstructure of fly ash based geopolymer using crumb rubber as fine aggregate,” *KMUTT Research & Development Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 125-144. (in Thai)

[6] *Testing hardened concrete Past 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*, BS EN 12390-1, 2012.

[7] *Testing hardened concrete Past 2: Making and curing specimens for strength test*, BS EN 12390-2, 2009.

[8] *Testing hardened concrete Past 3: Compressive strength of test specimens*, BS EN 12390-3, 2009.

[9] N. Mongkhpn, “Effect of cement to aggregate ratio and compaction effect on properties of

pervious concrete made of ternary-sized gravel," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 23, no. 2, pp. 60-66, 2016.

[10] S. A. Arafa, A. Z. M. Ali, S. N. Rahmat, and Y. L. Lee, "Optimum mix for pervious geopolymer concrete (GEOCRETE) based on water permeability and compressive strength," MATEC Web of Conferences vol. 103, 01024, 2017. doi.org/10.1051/matecconf/201710301024.

[11] J. Temuujin, A. van Riessen, and K. J. D. MacKenzie, "Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 10, pp. 1906–1910, 2010. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.012.

[12] R. P. Williams and A. Van Riessen, "Determination of the reactive component of fly ashes for geopolymer production using XRF and XRD," *Fuel*, vol. 89, no. 12, pp. 3683–3692, 2010. doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.031.

[13] Y. Huang, M. Han, and R. Yi, "Microstructure and properties of fly ash-based geopolymeric material with 5A zeolite as a filler," *Construction and Building Materials*, vol. 33, pp. 84–89, 2012. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.014.

[14] T. Xie and T. Ozbakkaloglu, "Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature," *Ceramics International*, vol. 41, pp. 5945-5958, 2015. doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.031.

[15] A. Hawa and W. Prachasaree, "Metakaolin Based Geopolymer," *Princess of Naradhiwas University Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 155-167, 2016. (in Thai)