ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน

กนกเนตร ขี้นนกคุ้ม[1] วริศรา โกระวิโยธิน[1] และ วิเชียร ชาลี[2]*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของขนาดมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัด และอัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่าง Si/Al คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 3 ขนาด คือ 3/8”(S), 1/2”(M) และ 3/4”(L) หล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มม.^{3} เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในอากาศ 3, 14 และ 28 วัน และทดสอบอัตราการไหลของน้ำในคอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้นแต่จะลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NaOH ลดลง นอกจากนั้นพบว่า การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กลง ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นและอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนลดลง

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ความเข้มข้นของ NaOH เถ้าถ่านหิน กำลังอัด อัตราการไหลของน้ำ

[1] นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9791-5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th

รับเมื่อ 18 มีนาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 17 ตุลาคม 2556

The Effect of Na(OH) Concentration on the Water Flow Rate and Compressive Strengths of Fly Ash-based Geopolymer Porous Concrete

Kanoknet Kuennokkhum[1] Warisara Koraviyothin[1] and Wichian Chalee[2]*

Abstract

In this research, the effect of size of coarse aggregate and sodium hydroxide (NaOH) concentrations on the compressive strength and water flow rate of porous geopolymer concrete was studied. Geopolymer concrete was prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The Si/Al ratio was kept constant and the concentration of NaOH varied from 8 to 10, 12, and 14 molar. The maximum size of coarse aggregate varied from 3/8 (S) to 1/2 (M) and 3/4 (L) inches. The porous concrete cube specimens of 100×100×100 mm^3 were cast for a compressive strength test at 3, 14, and 28 days air cure and the water flow rate of the porous geopolymer concrete was also tested at 28 days. The results showed that the compressive strength of the porous geopolymer concrete increased with an increase in NaOH concentration but a slight decrease of compressive strength was found when the NaOH concentration was up to 14 molar. The water flow rate of the porous geopolymer concrete increased with the decrease of the NaOH concentration. In addition, using a smaller size of coarse aggregate resulted in a higher compressive strength and lower water flow rate in the porous geopolymer concrete.

Keywords: Geopolymer Porous Concrete, NaOH Concentration, Fly Ash, Compressive Strength, Water Flow Rate

1 Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

* Corresponding Author, Tel. 08-9791-5171, E-mail: wichian@buu.ac.th

Received 18 March 2013; Accepted 17 October 2013

1. บทนำ

คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่ไม่ใช้มวลรวมละเอียด ซึ่งมีการพัฒนาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่รักษาสภาพแวดล้อม และนำมาใช้ในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น งานปูผิวถนน งานดาดคลองและพื้น ที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงอยู่ได้อาทิพืชและสัตว์ขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมอื่นๆ เช่น ใช้เป็นฉนวนความร้อน เป็นวัสดุช่วยเก็บเสียง วัสดุช่วยระบายน้ำ รวมทั้งโครงสร้างทางชลศาสตร์สำหรับกันคลื่นกระแทก เป็นต้น

การศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตพรุน จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผ่านมา [1], [2] พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตพรุนจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.20-0.25 โดยมีอัตราส่วนช่องว่างในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25 การใช้หินกรวดที่มีขนาดคละกันจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตพรุนสูงขึ้นและให้ความพรุนในระดับที่ใช้งานได้ดี โดยกำลังอัดของคอนกรีตพรุนจะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ในคอนกรีตพรุนที่มีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากัน การใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตพรุนสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้มวลรวมหยาบในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตพรุนลดลง [3] การผลิตคอนกรีตพรุนที่ดีจะต้องได้ส่วนผสมที่ทำให้คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดที่สูงภายใต้ความพรุนที่สูงด้วย ซึ่งเป็นการยากที่จะผลิตคอนกรีตให้มีลักษณะดังกล่าว เนื่องจากคอนกรีตที่มีความพรุนสูงมักจะมีกำลังอัดต่ำลงอย่างชัดเจน [4] ดังนั้นแนวทางในการเลือกส่วนผสมเพื่อผลิตคอนกรีตพรุนที่ดีควรพิจารณาจากกำลังอัดที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยให้มีความพรุนมากที่สุด

การศึกษาวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตเริ่มมีในประเทศไทยมากขึ้น [5] – [8] ทั้งนี้เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องของความเป็นวัสดุประสานได้โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่เป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแทน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ ตลอดจนเป็นแนวทางที่ส่งเสริมการลดมลพิษและสภาวะโลกร้อน ที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ได้ การผลิตวัสดุประสานที่เป็นจีโอพอลิเมอร์ เป็นการใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลสารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ [9], [10] ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ สารปอซโซลานที่สามารถใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ดินขาวเผา เป็นต้น นอกจากนั้นการศึกษาที่ผ่านมา [11] พบว่าการผสมซิลิกาฟูมในเถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ สามารถทำให้กำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์อีกทางด้วย สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการใช้งานคอนกรีตที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขาดความมั่นใจในการนำมาใช้งาน เพราะฐานข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังมีไม่มากพอ ตลอดจนการใช้วัสดุประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถก่อสร้างได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้ช่างที่มีความชำนาญสูงมาก ประกอบกับยังไม่เกิดปัญหาขาดแคลนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตาม แนวการส่งเสริมเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างจริงจังในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ควรเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เป็นการสนับสนุนและเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานให้มากขึ้น โดยเริ่มจากการใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตที่ไม่มีความซับซ้อนมาก และมีลักษณะการรับแรงเชิงกลที่ไม่เสี่ยงต่อการวิบัติและก่อให้เกิดอันตราย ตลอดจนส่งเสริมให้มีการใช้งานในงานก่อสร้างคอนกรีตพื้นฐาน เช่น คอนกรีตพรุน คอนกรีตบล็อคปูพื้น หรือวัสดุงานก่อผนัง เป็นต้น การเริ่มต้นใช้งานดังกล่าวจำเป็นที่ต้องมีข้อมูลการวิจัยที่น่าเชื่อถือได้เป็นฐานข้อมูลประกอบ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการผลิตคอนกรีตพรุนโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่ใช้เถ้าถ่านหินในการทำ

วัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยมุ่งประเด็นไปที่ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และขนาดมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพรุน

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานได้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [12] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 70.91 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [12] โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°ซ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 9.5 มม.(3/8''), 12.5 มม.(1/2") และ 19 มม. (3/4") ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C127 [13] แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO_2	34.10
Aluminum Oxide, Al_2O_3	19.90
Iron Oxide, Fe_2O_3	16.91
Calcium Oxide, CaO	18.75
Magnesium Oxide, MgO	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.69
Potassium Oxide, K_2O	2.38
Sulfur Trioxide, SO_3	2.21
Loss On Ignition, LOI	0.11

รูปที่ 1 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่บ่มในอากาศ

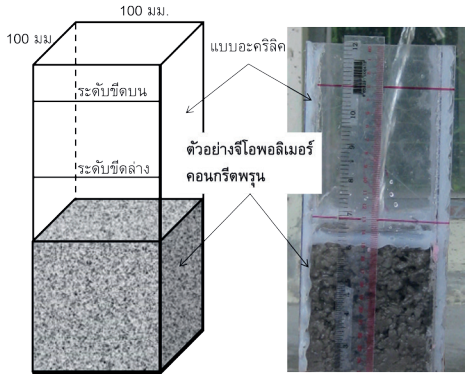
ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

การทดสอบ	มวลรวมหยาบ		
	หิน 3/8' (S)	หิน 1/2' (M)	หิน 3/4' (L)
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72	2.71	2.71
Absorption (%)	0.45	0.42	0.39

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่ และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มวลรวมใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 3 ขนาด ได้แก่ หิน 3/8'' (S) หิน 1/2'' (M) และหิน 3/4'' (L) โดยส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนแสดงดังตารางที่ 3 ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบได้ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นผสมเถ้าถ่านหินให้เข้ากันกับสารที่เตรียมไว้แล้วใส่มวลรวม โดยหล่อตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มม.^{3} เพื่อทดสอบกำลังอัด โดยอ้างอิงกับมาตรฐาน BS 1881 [14] ซึ่งเป็นมาตรฐานในงานคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบ (รูปที่ 1) จากนั้นทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่อายุบ่มในอากาศ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบอัตราการไหลของน้ำที่อายุ 28 วัน



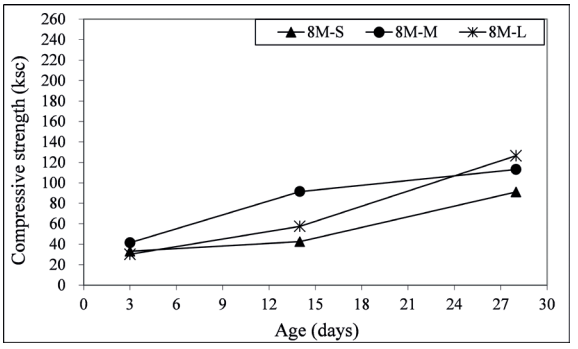
รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

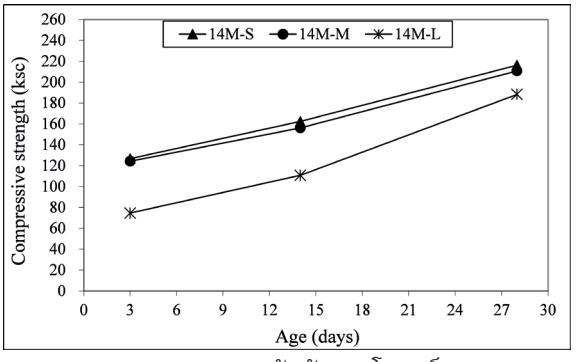
ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก/ม³)						ความเข้มข้นของ NaOH (โมลาร์)
	เถ้าถ่านหิน	หิน			NaOH	$Na_2O:SiO_3$	
		3/8"	1/2"	3/4"			
8M-S	386	1350			84	167	8
8M-M	386		1350		84	167	8
8M-L	386			1350	84	167	8
10M-S	386	1350			84	167	10
10M-M	386		1350		84	167	10
10M-L	386			1350	84	167	10
12M-S	386	1350			84	167	12
12M-M	386		1350		84	167	12
12M-L	386			1350	84	167	12
14M-S	386	1350			84	167	14
14M-M	386		1350		84	167	14
14M-L	386			1350	84	167	14

2.2.2 การทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนโดยจับเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่างทดสอบในปริมาตรที่กำหนด (จากขีดระดับบนถึงระดับล่าง) ซึ่งสามารถหาการซึมผ่านน้ำในรูปของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยคำนวณจากปริมาตรน้ำต่อเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่าง รูปที่ 2 แสดงการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน



ก) Na(OH) เข้มข้น 8 โมลาร์



ข) Na(OH) เข้มข้น 14 โมลาร์

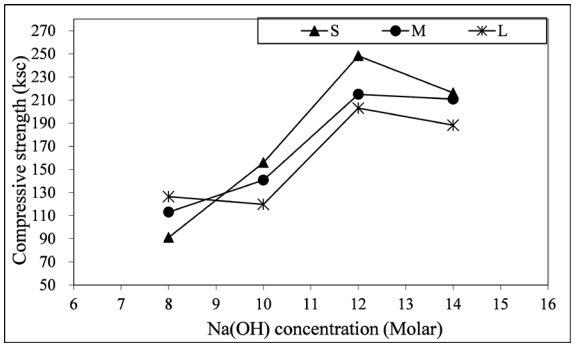
รูปที่ 3 ผลกระทบของ Na(OH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

3.1.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และขนาดมวลรวมหยาบต่างกันแสดงดังตารางที่ 4 โดยรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน หลังบ่มในอากาศเป็นเวลา 3, 14 และ 28 วัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8 และ 14 โมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (8 โมลาร์) และมีความเข้มข้นสูง (14 โมลาร์) ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางเดียวกันคือ



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาที่บ่มในอากาศ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีการพัฒนาสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนั้นพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง (รูปที่ 4(ข)) มีแนวโน้มมากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (รูปที่ 4(ก)) การที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น อาจเป็นเพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินออกมาก และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ทำให้เพสต์มีความแข็งแรงและยึดเกาะกับมวลรวมได้แน่น [7], [15], [16] จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีการพัฒนากำลังอัดมากขึ้นตามอายุที่บ่มในอากาศ

ตารางที่ 4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก/ม^3)	กำลังอัด (กก/ซม^2)		
		3 วัน	14 วัน	28 วัน
8M-S	1964	33.1	42.5	91.1
8M-M	2078	41.5	91.5	113.1
8M-L	2000	30.2	57.5	126.5
10M-S	2089	35.7	85.6	155.9
10M-M	2071	58.8	114.3	140.8
10M-L	1992	29.4	108.2	119.8
12M-S	2160	74.1	131.3	248.3
12M-M	2153	75.3	158.6	215.0
12M-L	2090	95.8	166.3	203.0
14M-S	2159	126.7	162.4	216.3
14M-M	2134	124.3	156.2	210.8
14M-L	2095	74.6	110.8	188.3

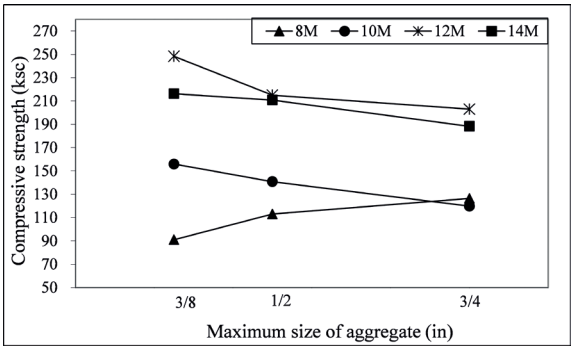
3.1.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ดังรูปที่ 4 พบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [16], [17] ทั้งนี้เนื่องจากด่างที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย แต่พบว่ากำลังอัดมีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ ซึ่งมีแนวโน้มทิศทางเดียวกันในทุกขนาดของมวลรวมหยาบ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ และใช้มวลรวมหยาบขนาด 3/8” (S) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 91.1, 155.9, 248.3 และ 216.3 กก./ซม^2 ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงที่สุด โดยที่ขนาดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 3/8” (S), 1/2” (M) และ

3/4" (L) ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 248.3, 215.0 และ 203.0 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ให้กำลังอัดต่ำสุด โดยที่ขนาดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 91.1, 113.1 และ 126.5 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การที่กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 14 โมลาร์ อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความเข้มข้นมากไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น [16] อาจส่งผลต่อการยึดเกาะของจีโอพอลิเมอร์เจลกับมวลรวมในคอนกรีตลดลงได้

3.1.3 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

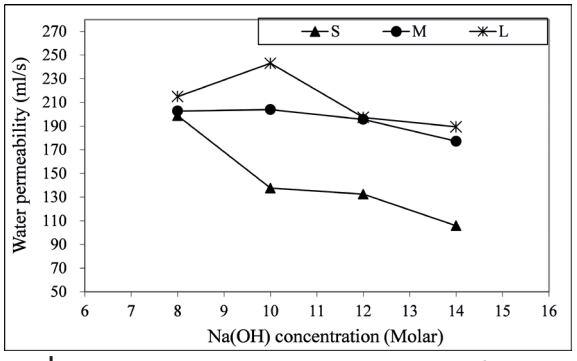
เมื่อพิจารณาผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน ดังรูปที่ 5 พบว่าขนาดมวลรวมหยาบที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ขณะที่การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ (8 โมลาร์) กลับพบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ให้กำลังอัดเมื่อใช้ขนาดของมวลรวมหยาบ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) เท่ากับ 216.3, 210.8 และ 188.3 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ขณะที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนในกลุ่มเดียวกัน เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์มีกำลังอัดเท่ากับ 91.1, 113.1 และ 126.5 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้ขนาดของมวลรวมหยาบที่ละเอียดขึ้นในจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นมากขึ้น) ส่งผลดีต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ซึ่งอาจเกิดจากมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลงมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ยึดเกาะระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมได้แข็งแรงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดจึงสูงขึ้น ส่วนในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำพบว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์จะมีความแข็งแรงต่ำลง การใช้มวลรวมที่ละเอียดขึ้น อาจไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ซึ่งสอดคล้องกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปที่พบว่า ขนาดของมวลรวมหยาบที่ละเอียดมากขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตกำลังสูงมากกว่าคอนกรีตกำลังต่ำ [18]



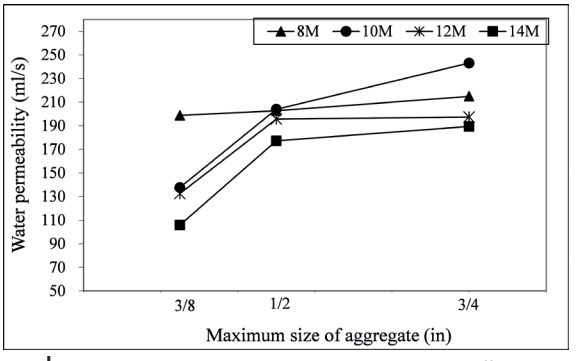
รูปที่ 5 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน

3.2 อัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน ดังรูปที่ 6 พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนต่ำลง และให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันในมวลรวมหยาบทั้ง 3 ขนาด เช่น การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็ก (S) ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย



รูปที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 7 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน

โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ให้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 198.8, 137.6, 132.5 และ 105.8 มล./วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีกำลังอัดที่ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง จึงทำให้ความพรุนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีน้อยลง และส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำต่ำลงด้วย [17] นอกจากนี้พบว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นมีผลต่อการลดอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่ เช่น การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 โมลาร์เป็น 14 โมลาร์ พบว่าอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็ก (S) ลดลงเท่ากับ 93 มล./วินาที (ลดจาก 198.8 มล./วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 8 โมลาร์เป็น 105.8 มล./วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นที่ 14 โมลาร์) ขณะที่การใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (L) ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำลดลงเท่ากับ 25.5 มล./วินาที (ลดจาก 214.9 มล./วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 8 โมลาร์เป็น 189.4 มล./วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 14 โมลาร์) ผลดังกล่าวอาจเกิดจากมวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะได้ดีกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ จึงมีผลให้อัตราการไหลของน้ำของคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก ขึ้นกับสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ มากกว่าคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์แข็งแรงมากขึ้น จึงส่งผลให้ลดอัตราการไหลของน้ำในคอนกรีตพรุนลงได้โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา [2] ที่พบว่าการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตพรุนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามความพรุนที่มากขึ้น มีผลชัดเจนในคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่

รูปที่ 7 แสดงผลของขนาดมวลรวมหยาบต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน พบว่ามวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพิ่มมากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้มวลรวมหยาบขนาด S, M และ L มีอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 105.8, 177.2 และ 189.4 มล./วินาที ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากขนาดของช่องว่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์

กับมวลรวมขนาดใหญ่ มีมากกว่ามวลรวมขนาดเล็ก จึงส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 5 อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	อัตราการไหลของน้ำ (มล/วินาที)
8M-S	198.8
8M-M	202.7
8M-L	214.9
10M-S	137.6
10M-M	204
10M-L	243.1
12M-S	132.5
12M-M	195.7
12M-L	197.3
14M-S	105.8
14M-M	177.2
14M-L	189.4

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงที่สุด

2) การใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้น และเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ

3) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีค่าสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ มีค่าอัตราการไหลของน้ำมากที่สุด

4) การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงมีผลต่อการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่

5) การใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ขึ้นในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพิ่มมากขึ้น โดยการซึมผ่านของน้ำมีค่าสูงที่สุดในมวลรวมหยาบขนาด 3/4" (L) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2556

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, and Y. Yuasa, “Cement paste characteristics and porous concrete properties,” *Construction and Building Materials*, vol.22, pp. 894-901, 2008.

[2] P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, N. Mishima, Y. Yuasa, and T. Chareerat, “Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete,” *Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol.16, pp. 714-719, 2009.

[3] S. Tongaroonsri, S. Lekauwsay, V. Nunpakde, and O. Punyanak. “Development of porous light weight concrete block for green building,” *The Journal of Industrial Technology*, vol. 7, no.2, pp. 22-30, 2011 (in Thai).

[4] C. Lian, Y. Zhuge, and S. Beecham, “The relationship between porosity and strength for porous concrete,” *Construction and Building Materials*, vol.25, pp. 4294-4298, 2011.

[5] W. Chalee and K. Charoenprom. "Evaluation of sulfate resistance of fly ash-based geopolymer concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, vol.35, no.2, pp. 157-170, 2012 (in Thai).

[6] C. Sanawong and W. Chalee. "Chloride penetration of fly ash-based geopolymer concrete under marine environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no.2, pp. 257-265, 2011 (in Thai).

[7] P. Chindaprasirt, W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste Management*, vol.29, pp. 539-543, 2009.

[8] P. Chawakitchareon and C. Veesommai. "Effect of curing time on strength of geopolymer mortar incorporating silica waste," *The Journal of Industrial Technology*, vol.8, no.3, pp. 52-60, 2012 (in Thai).

[9] J. Temuujin, Riessen A. van, and KJD. MacKenzie, "Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature," *Construction and Building Materials*, vol.24, pp. 1906-1910, 2010.

[10] J. Davidovits, "Chemistry of geopolymer system, Terminology," in *Proceeding of Second International Conference Geopolymer*, 1999, France, pp 9-39.

[11] P. Paisitsrisawat, U. Rattanasak. "Effect of silica fume on properties of fluidized combustion (FBC) fly ash geopolymer," *The Journal of Industrial Technology*, vol.9, no.9, pp. 40-48, 2013 (in Thai).

[12] *ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, C 618-03. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.

[13] *ASTM. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*, C 127-12. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.

[14] *BS. Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes*, BS 1881-116. British Standards Institution 1983.

[15] T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, P. Chindaprasirt, and S. Songpiriyakij, "Influence of Si/Al ratio on compressive strength of rice husk-bark ashes and fly ash-based geopolymer paste," in *The 3rd ACF international conference ACF/VCA*, 2008, pp. 151-157.

[16] C. Sanawong, K. Somna, and W. Chalee, "Compressive and bond strengths of fly ash-based geopolymer concrete," *Burapha Sci*., vol.15, no.1, pp. 13-22, 2010 (in Thai).

[17] C. Sanawong, and W. Chalee, "Water permeability in fly ash based geopolymer concrete," *J. of Civil engineering and architecture*, vol.4, pp. 15-19, 2010.

[18] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement, Pozzolan and Concrete," in *5th ed, Thailand Concrete Association*, 2008, pp. 11-13, and pp. 238-240 (in Thai).