กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน

Compressive and Bond Strengths of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete

ชรินทร์ เสนาวงษ์[1], เกียรติสุดา สมนา[2] และ วิเชียร ชาลี[3]*

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[3]*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Charin Sanawong[1], Kaitsuda Somna[2] and Wichian Chalee[3]*

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

[2]Department of Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isaan, Nakornratchasima.

[3]*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 หลังจากหล่อตัวอย่างทดสอบแกะแบบและ บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน นอกจากนั้นได้ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว (ใช้เหล็กข้ออ้อยเส้นผ่าศูนย์กลาง 12, 16 และ 20 มม. เกรด SD 30) ที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ ในการศึกษาครั้งนี้สามารถหาสมการเพื่อคำนวณกำลังยึดเหนี่ยวเมื่อใช้เหล็กข้ออ้อยคือ $u_{Geo} = 2.50\sqrt{f_c'}/D$ โดยค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากสมการนี้มีค่าสูงกว่าสมการของ ว.ส.ท. ประมาณร้อยละ 10

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต เถ้าถ่านหิน กำลังอัด กำลังยึดเหนี่ยว ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สมการคำนวณแรงยึดเหนี่ยว

***Corresponding author.** E-mail: wichian@buu.ac.th

Abstract

This research, the effect of sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive and bond strengths of geopolymer concretes were studied. The geopolymer concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The concentration of NaOH was varied at 8, 10, 12, and 14 molar and the Si/Al ratio was kept constant at 1.98. The concrete specimens were air-cured at room temperature and the compressive strength was tested at the ages of 7, 14, 28 and 60 days. In addition, the bond strength of geopolymer concrete (using deformed bar of 12, 16, and 20-mm in diameter, grade SD 30) was investigated at 28-day. The results showed that the compressive strength of geopolymer concrete significantly increased with the increase in concentration of NaOH. In the first 14-day curing, a dramatically increasing of compressive strength was found and then it showed gradually increased after 14 days. However, the geopolymer concrete with a high concentration of NaOH (14 molar) continuously gained strength (up to 60 days) faster than those of low concentration of NaOH. Besides, bond strength of geopolymer concrete also increase with NaOH concentration but they were found to decrease when the NaOH concentration was up to 14 molar. The equation of bond strength of deformed bar in geopolymer concrete, $u_{Geo} = 2.50\sqrt{f_c'}/D$ was used to calculate the results which higher than that of EIT recommendation about 10%.

Keywords : Geopolymer concrete, Fly ash, Compressive strength, Bond strength, NaOH concentration, Equation of bond strength

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

บทนำ

วัสดุ จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ได้จากการนำสารละลายแอลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงมากระตุ้นสารเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น เถ้าถ่านหินหรือเถ้าชีวมวลที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม การยึดประสานดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นส่วนประกอบ กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชั่น (Polycondensation) และได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ (Davidovits, 1999)

ในงานวิจัยที่ผ่านมา (เธียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, 2549; ปริญญา จินดาประเสริฐ 2548 ; วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552 ; อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2551) ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al เป็นต้น โดยทำการศึกษาในลักษณะที่เป็นเพสต์ หรือ มอร์ต้าร์ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในงานโครงสร้างคอนกรีต จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัว ทั้งนี้ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการกำหนดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานเพื่อทดสอบการใช้งานเหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงดัด จำเป็นต้องคำนึงถึงความต้านทานต่อการลื่นไถลของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีต แรงต้านทานนี้ เกิดจากการยึดติดกันระหว่างเหล็กเสริมกับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และมีความสำคัญในการกำหนดระยะฝังเพิ่มของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยกำลังยึดเหนี่ยวในคอนกรีตจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของการยึดติดดังกล่าว กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทาน และการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นสำคัญ นอกจากนี้อาจมีผลจากการหดตัวของคอนกรีตเมื่อเทียบกับการหดตัวของเหล็ก แรงยึดเหนี่ยวดังกล่าว นอกจากจะขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตแล้ว ยังขึ้นกับคุณภาพของเหล็กเสริมตลอดจนตำแหน่งของเหล็กเสริมด้วย

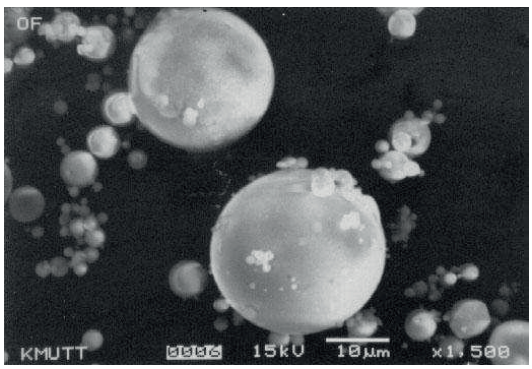
ในการศึกษาที่ผ่านมา (วีระพงษ์ พิกุลประยงค์ และวันชัย ยอดสุดใจ, 2552) พบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความเหนียวและสามารถที่จะยึดเกาะกับวัสดุอื่นได้ดี ไม่ว่าจะเป็นการยึดเกาะกับเหล็ก หรือเนื้อคอนกรีต และมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์สำหรับใช้ในงานซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะมาเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากเป็นเถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติทางปอซโซลาน (pozzolan) ที่ดี สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์หรือผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์ได้ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการใช้งานจริงต่อไป

วิธีการศึกษา

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1.1 วัสดุประสาน

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 ลักษณะของเถ้าถ่านหินแม่เมาะจากโรงงานโดยตรง มีสีน้ำตาลปนเทา เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ภาพขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ได้รับจากโรงงานโดยตรง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน	
Silicon Dioxide, SiO_2 (%)	32.10
Aluminum Oxide, Al_2O_3 (%)	19.90
Iron Oxide, Fe_2O_3 (%)	16.91
Calcium Oxide, CaO (%)	18.75
Magnesium Oxide, MgO (%)	3.47
Sodium Oxide, Na_2O (%)	0.69
Potassium Oxide, K_2O (%)	2.38
Sulfur Trioxide, SO_3 (%)	2.24
Loss On Ignition, LOI (%)	0.07

เห็นได้ว่ารูปร่างของ เถ้าถ่านหินแม่เมาะมี ลักษณะเป็นทรงกลมตันผิวเรียบ มีขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน ส่วนองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer พบว่า มี SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสารต่างๆ เหล่านี้รวมกันถึงร้อยละ 88 และมีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 68.9 จึงจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งมีอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30 ˚C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์

1.2 มวลรวม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.52 และ 1.01 ตามลำดับ

2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 2 ทำการหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28, และ 60 วัน และหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด 150x150x150 มม.^{3} พร้อมใส่เหล็กข้ออ้อยขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 12, 16, และ 20 มม. เกรด SD 30 ในแนวดิ่ง เพื่อทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน โดยภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม

2.2 วิธีการทดสอบ

ทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7, 14, 28, และ 60 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 และทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C234-91a โดยภาพที่ 3 แสดงการทดสอบกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เครื่อง Compression machine และ Universal testing machine ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก./ลบ.ม.)					ค่ายุบตัว (มม.)
	เถ้าถ่านหิน	NaOH	Na_2SiO_3	ทราย	หิน	
8-M	390	67	167	585	1092	25
10-M	390	67	167	585	1092	25
12-M	390	67	167	585	1092	25
14-M	390	67	167	585	1092	25

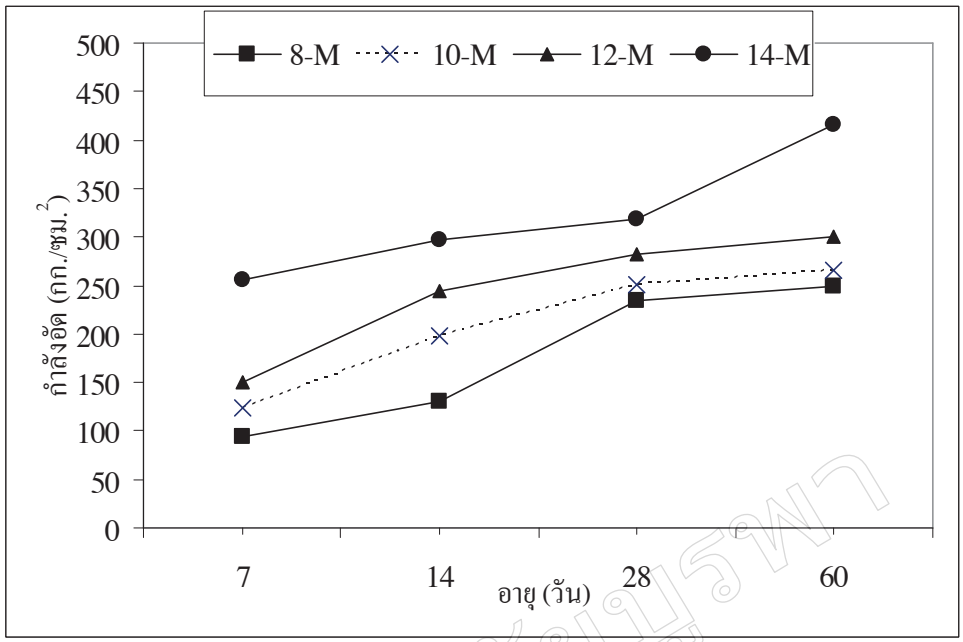
ภาพที่ 2 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังยืดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

(ก) การทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบ Compression Machine ขนาด 30 ตัน

(ข) การทดสอบกำลังยืดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาด 150 ตัน

ภาพที่ 3 การทดสอบกำลังอัดและกำลังยืดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



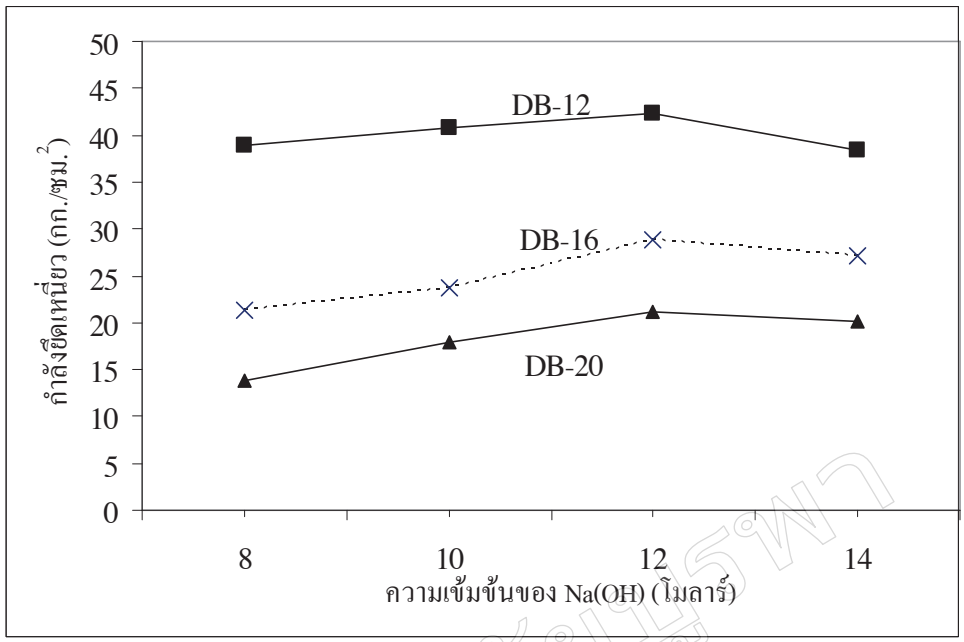
ภาพที่ 4 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามระยะเวลาที่บ่มในอากาศ

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

1. กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและระยะเวลาที่บ่มในอากาศ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาการบ่ม โดยกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มสูงในช่วง 14 วันแรก ส่วนในช่วง 14 ถึง 60 วันกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มที่ลดลง อย่างไรก็ตามการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย (NaOH) สูงถึง 14 โมลาร์ ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจาก 28 ถึง 60 วัน เพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัด เพิ่มจาก 318 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน เป็น 416 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มอื่นๆ ที่มีความเข้มข้นของ (NaOH) ที่ต่ำกว่า มีการพัฒนากำลังอัดที่ระยะเวลาดังกล่าว ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ (NaOH) 14 โมลาร์อย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แสดงในภาพที่ 4 พบว่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้น ซึ่งผลการวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt, 2009 ; Klabprasit, 2008) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชั่น (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8 โมลาร์พบว่า ที่อายุ 7 วัน มีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ ค่อนข้างชัดเจน แต่เมื่อระยะเวลานานขึ้น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้มีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องและเกือบเท่ากับกลุ่มที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ที่อายุ 60 วัน โดยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8, 10, 12, และ 14 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เท่ากับ 249, 266, 300 และ 416 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูงถึงแม้จะให้กำลังอัดที่สูง แต่ค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก็จะสูงด้วย ดังนั้นแนวทางในการศึกษา จะพิจารณาถึงความเข้มข้นเหมาะสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ส่งผลต่อกำลังอัดเพื่อนำไปใช้งานได้ดี ตลอดจนต้องมีความข้นเหลวที่สามารถเทเข้าแบบได้โดยไม่เกิดการแยกตัว ซึ่งตามภาพที่ 4 พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 8 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 14 วัน ค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต โดยเฉพาะคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูงในช่วงแรก ส่วนกลุ่มคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 8 โมลาร์ ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดีทั้งทางด้านกำลังอัด และความสามารถ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

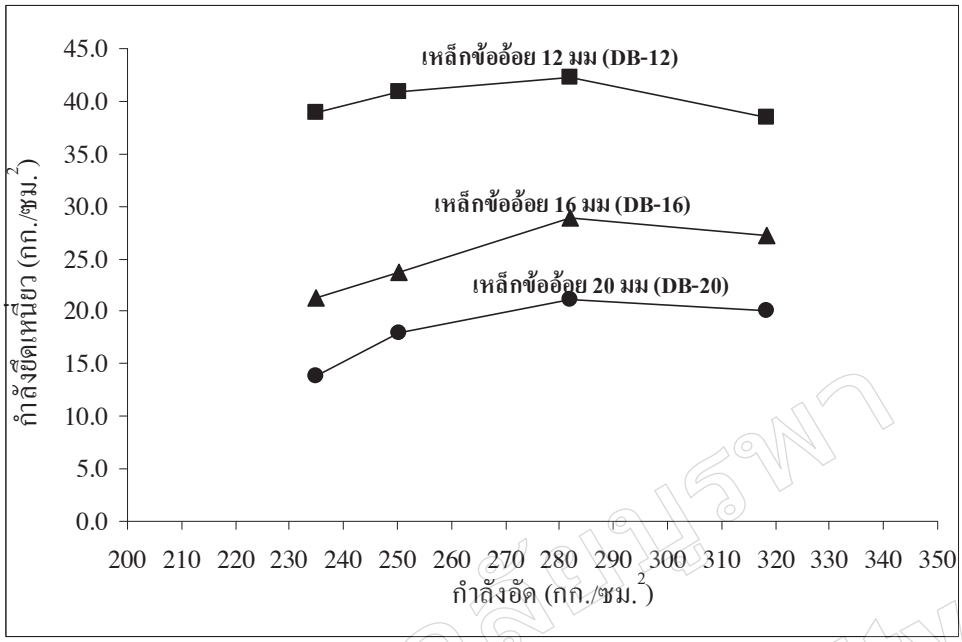


ภาพที่ 5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

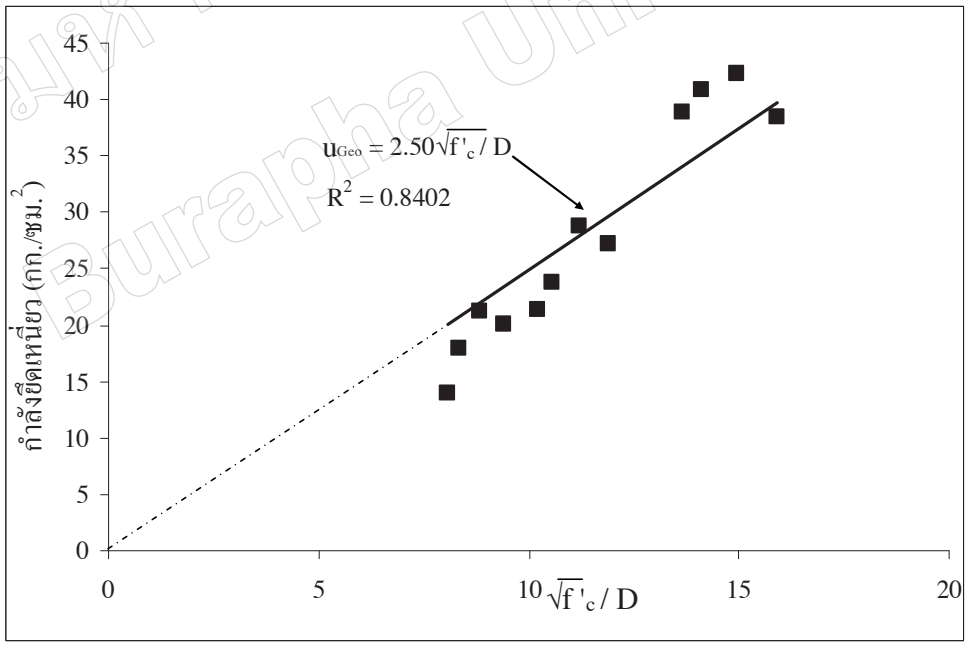
ในการทำงานได้ของคอนกรีตสด โดยไม่เกิดการแยกตัว โดยจีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกันมากโดยมีค่าประมาณ 25 มม.

2. กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดระหว่างเหล็กเสริมและจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหาได้จากการวิบัติที่มีการครูดหรือลื่นไถลโดยที่เหล็กเสริมไม่ขาด หรือวิบัติ ซึ่งหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่คำนวณได้ในเหล็กข้ออ้อยที่มีขนาดเล็กกว่า พบว่ามีค่าสูงกว่าเหล็กที่มีขนาดใหญ่ และให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาในคอนกรีตธรรมดาที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, 2552) เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อยตามภาพที่ 5 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพิ่มขึ้น กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ เช่น กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็ก DB-12 กับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มีกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 38.9, 40.8, 42.3 และ 38.4 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังยึดเหนี่ยวในเหล็ก DB-16 และ DB-20 กำลังยึดเหนี่ยวในเหล็กข้ออ้อยทุกขนาดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ โดยมีกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดในเหล็ก DB-12, DB-16 และ DB-20 เท่ากับ 42.3, 28.8 และ 20.1 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่ามากขึ้นตามกำลังอัด เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อยู่ในช่วง 8 ถึง 12 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้นสูงถึง 14 โมลาร์ กลับพบว่า กำลังยึดเหนี่ยว มีค่าลดลง ถึงแม้ว่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยทั่วไปแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ จะมีค่าแปรผันตรงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 200 กก./ซม.^{2} เมื่อกำลังของคอนกรีตสูงขึ้นกว่านี้ กำลังยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงหรือเกือบคงที่ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ซึ่งแนวโน้มดังกล่าว สอดคล้องกับผลของการศึกษาในครั้งนี้ที่กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามกำลังอัดที่สูงขึ้น จนกำลังอัดมีค่าประมาณ 300 กก./ซม.^{2} กำลังยึดเหนี่ยวจึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย การที่กำลังยึดเหนี่ยวในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงในคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงอาจเป็นผลมาจากปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูง มีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ และไปเกาะที่ผิวเหล็กซึ่งเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนชื้น จะเกิดการเยิ้มตัวและส่งผลให้เหล็กลื่นไถลได้ ซึ่งสังเกต



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและค่า $\sqrt{f_c'} / D$

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ได้จากเมื่อพรมน้ำที่ผิวเหล็กในส่วนที่ฝังในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีลักษณะลื่น โดยแนวโน้มดังกล่าวแสดงชัดเจนในภาพที่ 6 ที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อย

ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (u_{Geo}) กับ $\sqrt{f_c'}/D$ และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ คือ $u_{Geo} = 2.50\sqrt{f_c'}/D$ เมื่อ f_c' คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน (อยู่ในช่วง 230 ถึง 320 กก./ซม.^{2}) และ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กข้ออ้อย (ซม.) ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการที่แสดงค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) คือ $u_{all} = 2.29\sqrt{f_c'}/D$ (ว.ส.ท.1007-34, 2537) พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ได้จากสมการของ ว.ส.ท. เพียงร้อยละ 10 เท่านั้น

สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน มีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาและมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงในช่วง 14 วันแรก แต่อัตราการเพิ่มลดลงในช่วง 14 ถึง 60 วัน ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีค่าสูงในช่วงแรก จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชั่น (Polycondensation) สูงด้วย และส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 14 วันแรก

2) จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูง (14 โมลาร์) มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (ต่ำกว่า 12 โมลาร์)

3) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากขึ้น เนื่องจากการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชั่น (Polycondensation) ได้สมบูรณ์และส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น

4) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวมีค่าสูงขึ้น แต่มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพิ่มขึ้นเป็น 14 โมลาร์

5) กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ มีสมการ คือ $u_{Geo} = 2.50\sqrt{f_c'}/D$ และมีค่าสูงกว่าสมการของ ว.ส.ท. ประมาณร้อยละ 10

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 6/2553

เอกสารอ้างอิง

ปริญญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชารีรัตน์, วราภรณ์ คุณาวนากิจ และอนุชาติ ลื้อนันต์ศักดิ์ศิริ. (2548). การศึกษาเบื้องต้นการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ระยอง : หน้า 13-18.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมคอนกรีตไทย : หน้า 197-199.

เธียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, สมิตร ส่งพิริยะกิจ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2549). การศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบเปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 2, อุดรธานี : หน้า MAT 53-58.

นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัวทัศนานนท์. (2552). แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : หน้า 1685-1691.

มาตรฐาน ว.ส.ท.1007-34, (2537). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2552). การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, *14*(1), 47-55

วีระพงษ์ พิกุลประยงค์ และวันชัย ยอดสุดใจ. (2552). คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : หน้า 1801-1805.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., 31*(2) , 371-381.

ASTM C234-91a. (2000). Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel. Annual Books of ASTM Standards V. 04.01 Philadelphia.

ASTM C618. (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Books of ASTM Standards V. 04.01 Philadelphia.

Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. Waste Management 29, (2) : pp 539-543.

Davidovits, J., (1999). Chemistry of geopolymer system, Terminology. In Proceeding of Second International Conference Geopolymer'99, France. : pp 9–39.

Klabprasit, T., Jaturapitakkul , C., Chalee, W., Chindaprasirt P. and Songpiriyakij, S. (2008). Influence of Si/Al ratio on Compressive Strength of Rice Husk–Bark Ashes and Fly Ash-based Geopolymer Paste. The 3rd ACF international conference ACF/VCA, Rex Hotel, Ho Chi Minh City, Vietnam : pp 151-157.

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University