รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

(Effect of rice husk ash fineness and NaOH concentration on the compressive strength of geopolymer concrete)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 258328

สัญญาเลขที่ 105/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

(Effect of rice husk ash fineness and NaOH concentration on the compressive strength of geopolymer concrete)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤศจิกายน 2560

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มีงบประมาณทั้งโครงการ 446,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	446,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบดำเท่ากับ 9:1 โดยน้ำหนัก ใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าแกลบดำไม่บด (**O**) เถ้าแกลบดำบดหยาบ (**M**) และเถ้าแกลบดำบดละเอียด (**F**) ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34 และ **30** ตามลำดับ ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (**NaOH**) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (**L/S**) เท่ากับ 0.90 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด 100**x**100**x**100 มม. แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และบ่มตัวอย่างในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบ ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความละเอียดของเถ้าแกลบดำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้เถ้าแกลบดำไม่บดอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉลี่ยถึงร้อยละ 60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นในช่วง 12 - 16 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีกำลังอัดสูงสุดที่ความเข้มข้น 16 โมลาร์และกำลังอัดลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเท่ากับ 18 โมลาร์ นอกจากนี้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้นตามอายุทดสอบและมีแนวโน้มการพัฒนาที่สูงในช่วงอายุต้น

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต, เถ้าแกลบดำ, เถ้าถ่านหิน, ความเข้มข้นของสารสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, กำลังอัด

Abstract

This research studies to study the effects of black rice husk ash fineness and sodium hydroxide solution concentration on the compressive strength of geopolymer concrete made of black rice husk ash and fly ash at the ratio of 9:1 by weight of binder. The fineness of black rice husk ash were classified into original (O), medium (M), and fine (F) corresponding to their percent retained by weight on a #325 – sieve less than 48, 34, and 30, respectively. Sodium silicate solution (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide solution (NaOH) with various concentrations of 12, 14, 16, and 18 molar were conducted with the liquid and solid (L/S) of 0.90 in geopolymer concrete mixtures. Cube specimens of 100x100x100 mm. were removed from the molds after being cast for 24 hours and then were cured with plastic wrap before compressive strength tests at the curing ages of 7, 14, 28, and 60 days. The study found that compressive strength increase with rice husk ash fineness. On average, compressive strength of the specimens containing small particle size of black rice husk ash were significantly higher than those of original particle size by about 60 percent. The greater in concentration of NaOH ranging from 12 - 16 molar also raised up the compressive strength. The highest compressive strength was obtained at the concentration of 16 molar and then its strength decreased at the greater concentration of 18 molar. Moreover, the compressive strength increased with curing time and developed greatly during the early period.

Keywords: Geopolymer concrete, Black rice husk ash, Fly ash, Sodium hydroxide concentration, Compressive strength

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 105/2560

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าแกลบ ซึ่งเป็นการส่งเสริมการใช้งานวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมในงานก่อสร้างโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ และเป็นวัสดุประสานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในงานคอนกรีต ให้สามารถใช้ในงานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

สารบัญ

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 จีโอพอลิเมอร์	4
2.2 วัสดุปอซโซลาน	6
2.3 เถ้าถ่านหิน	7
2.4 เถ้าแกลบ	10
2.5 มวลรวม	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	**18**
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	18
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช่ในการทดลอง	21
3.3 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา	22
3.4 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ	23

สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	**25**
4.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	25
4.2 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	27
4.3 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	30
4.4 ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	**35**
5.1 สรุปผล	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
เอกสารอ้างอิง	**46**
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	**39**
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	**46**
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	**48**

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 9
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ 11
3.1 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา 22
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน 26
4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน 29

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ 3
2.2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 8
2.3 ภาพถ่ายขยายผิวของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผา 12
2.4 ภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบที่บดละเอียด 13
2.5 ลักษณะรูปร่างของมวลรวม 15
3.1 เถ้าแกลบที่ใช้ในการทดสอบ 18
3.2 มวลรวมละเอียด 19
3.3 มวลรวมหยาบ 19
3.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต 20
3.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20
3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช่ในการทดลอง 22
3.7 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ 23
3.8 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแข็งตัวที่บ่มในอากาศ 24
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการศึกษา 26
4.2 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษา 27
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุที่บ่มในอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน 30
4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน 32
4.5 ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน 34

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การนำวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้ในงานคอนกรีตเป็นที่ให้ความสนใจในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัสดุดังกล่าว สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตแล้ว ยังช่วยกำจัดวัสดุที่อาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางด้วย นอกจากนั้นการใช้วัสดุเหลือทิ้งในงานคอนกรีตยังเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งเป็นการส่งเสริมการผลิตคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาที่ผ่านมา (Cheewaket, et al., 2007; Chalee et al., 2010 ; Somna, et al., 2012) เป็นที่ยอมรับว่าการใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต สามารถใช้งานได้ดี ทั้งสมบัติเชิงกลและความคงทนของคอนกรีต และมีการใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจัง จนทำให้ปริมาณการใช้เถ้าถ่านหินมีความต้องการสูงขึ้น ส่งผลให้มูลค่าของเถ้าถ่านหินสูงขึ้นอีกด้วย งานวิจัยในปัจจุบันจึงได้ให้ความสนใจในการพัฒนาวัสดุประสานชนิดอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถเป็นวัสดุปอซโซลานได้ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น (Sata, et al., 2007; Chalee et al., 2013 ; Sata, et al., 2012 ; Zain, et al., 2011) ถึงแม้ว่าวัสดุปอซโซลานเหล่านี้จะให้ผลการศึกษาเบื้องต้นไปในทิศทางที่ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของอนุภาคที่หยาบเกินไป ทำให้ต้องมีการบดให้ละเอียดก่อนถึงจะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ในงานคอนกรีตได้ จึงทำให้วัสดุประสานที่ใช้เถ้าชีวมวลเหล่านี้ ยังไม่มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ นอกจากนั้น การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของคุณภาพของวัสดุปอซโซลาน ตลอดจนยังมีความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานร่วมด้วย ดังนั้น แนวทางการพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่ โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่เรียกว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ จึงเป็นที่น่าสนใจในปัจุบัน โดยสารจีโอพอลิเมอร์เกิดจาก การก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์ จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมากและทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al โดยใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์พบว่า สามารถใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าชีวมวล (เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น) จากการเผาวัสดุเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระไฟฟ้า หรือใช้

วัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก ซึ่งทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมวัสดุปอซโซลานกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) โดยสารเร่งใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali Silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งสามารถผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้มีกำลังที่อุณหภูมิห้องได้ คุณภาพของวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ขึ้นกับ อุณหภูมิที่ใช้เร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของด่างที่ใช้ชะเอาซิลิกาและอะลูมินา ปริมาณของเหลวต่อของแข็ง อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552; Panha Huy และคณะ, 2559 ; ณัฐพัชร์ ผาติไตรวัฒน์ และ วิเชียร ชาลี, 2560) ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆเหล่านี้ที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการขยายผลการศึกษา ตลอดจนแนวทางในการเลือกใช้วัสดุและกระบวนการผลิตคอนกรีตจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการศึกษาที่หวังผลเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ ควรเน้นศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำวัสดุเหลือทิ้งที่มีมากในประเทศมาใช้งาน โดยปัจจัยที่ศึกษาต้องสอดคล้องกับการนำมาใช้งานได้ง่าย ภายใต้การรับแรงเชิงกลของคอนกรีตที่เหมาะสม ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาแกลบในโรงงานอุตสาหกรรม และมีปริมาณค่อนข้างสูง (ประมาณ 2 แสนตัน ต่อปี) ซึ่งเป็นงานวิจัยเพื่อพัฒนาการนำเถ้าแกลบมาใช้ในงานคอนกรีตโดยไม่ต้องผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อเพิ่มฐานข้อมูลในการเลือกใช้วัสดุในงานคอนกรีตโดยเน้นที่ความประหยัดและการใช้งานได้ดีตามหลักวิศวกรรมให้มากขึ้น และเน้นในส่วนของเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรง และแปรเปลี่ยนความละเอียดของเถ้าแกลบที่ไม่ต้องบดให้ละเอียดมาก ทั้งนี้เพื่อต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำมาใช้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบดเถ้าแกลบที่สูง อย่างไรตามการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบยังจำเป็นต้องหาอลูมิน่าจากแหล่งอื่นเนื่องจากเถ้าแกลบเองมีอลูมิน่าต่ำมาก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้เถ้าถ่านหินเป็นแหล่งให้สารประกอบอลูมิน่ากับวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) เพื่อศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ โดยใช้เถ้าถ่านหินผสมเพื่อให้สารประกอบอลูมิน่าในจีโอพอลิเมอร์

1.2.2) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ โดยใช้เถ้าถ่านหินผสมเพื่อให้สารประกอบอลูมิน่าในจีโอพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบดำเท่ากับ 9:1 โดยน้ำหนัก ใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าแกลบดำไม่บด (**O**) เถ้าแกลบดำบดหยาบ (**M**) และเถ้าแกลบดำบดละเอียด (**F**) ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48**,** 34 และ **30** ตามลำดับ ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ($\mathbf{Na_2SiO_3}$) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (**NaOH**) ที่มีความเข้มข้น 12**,** 14**,** 16 และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (**L/S**) เท่ากับ 0.90 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด 100**x**100**x**100 มม^3 แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และบ่มตัวอย่างในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบ ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มเป็นเวลา 7**,** 14**,** 28 และ 60 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงความละเอียดของเถ้าแกลบดำ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ที่ให้กำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างในทางวิศวกรรม ภายใต้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ

1.4.2 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

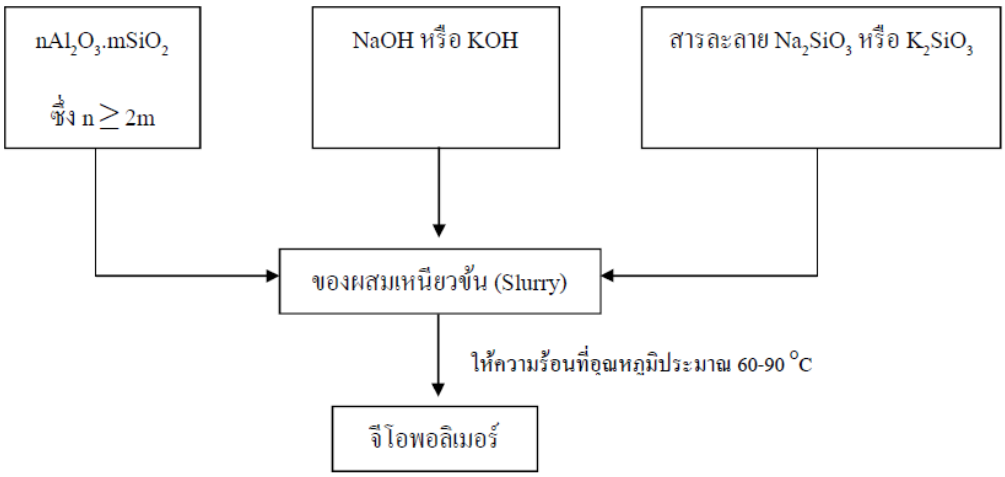
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบซึ่งประกอบไปด้วย จีโอพอลิเมอร์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ มวลรวม และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเป็นงานวิจัยที่ศึกษาผลของความละเอียด ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกำลังอัดจากการใช้จีโอพอลิเมอร์จากวัสดุปอซโซลาน

2.1 จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุที่ผสมอะลูมิโนซิลิเกต (สารประกอบที่มีอะลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ) มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) เกิดจากสารละลายด่าง (alkaline) ทำปฏิกิริยากับสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน (SiO_2) และอะลูมิเนียม (Al_2O_3) ที่อยู่ในวัสดุปอซโซลาน โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจนทำให้สารประกอบเหล่านี้แตกตัวและทำปฏิกิริยาลูกโซ่ซึ่งมีลักษณะเป็นโมเลกุลย่อยซ้ำๆต่อกันด้วยพันธะโควาเลนส์ ทำให้เกิดการแข็งตัวและสามารถรับกำลังได้ โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชั่น (polymerization) ซึ่งมีสมการดังนี้ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ วิเชียร ชาลี, 2549)

$$M_n [-(SiO_2)_z - AlO_2-]_n . w H_2O$$

โดยที่ M คือ ธาตุอัลคาไลน์
- คือ การยึดเกาะพันธะ
Z คือ จำนวนโมเลกุล
n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (อุบลรัตน์ รัตนศักดิ์ และวิเชียร ชาลี, 2549)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) หรือโซดาไฟเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ สามารถละลายได้ในน้ำ ประกอบไปด้วยโลหะโซเดียม และเบสไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นของแข็ง (ในรูปแบบผง เกล็ด เป็นแท่งหรือเม็ดกลม) สีขาว ไม่มีกลิ่น ดูดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 318 องศาเซลเซียส ผลิตได้จากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของน้ำเกลือ สามารถใช้ในงานผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้โดยทำหน้าที่เป็นตัวชะเอาซิลิกาและอะลูมินาในวัสดุปอซโซลานมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรด์เซชั่น

โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate, Na_2SiO_3) หรือที่รู้จักกันในชื่อน้ำแก้วหรือน้ำกาว เป็นสารประกอบที่ไปด้วยโซเดียมออกไซด์, ซิลิกา และน้ำ ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนต่างๆ และสารเคมีตัวนี้เป็นน้ำยาบ่มคอนกรีตชนิดโซเดียมซิลิเกต สามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีตและปูนฉาบได้อย่างดี ทำหน้าที่ถูกกำหนดให้มาทำปฏิกิริยากับหินปูน ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งขึ้น ลดรูพรุนที่เกิดจากน้ำในคอนกรีตที่ระเหยออกมาได้ โซเดียมซิลิเกตมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อมและทำให้เกิดโครงสร้างของพวกจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เผาที่ความร้อนสูง

สารประกอบซิลิกอนและอะลูมิเนียมพบได้มากในวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเถ้าแกลบนั้นมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินามากกว่าร้อยละ 90 (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

2.2 วัสดุปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่น้อยกว่า ร้อยละ	70	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ	4	5	5
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10	6	6

<u>หมายเหตุ</u>

1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
2. สามารถใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้
3. ชั้นคุณภาพ C (class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิ-ทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่

วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้งานในปัจจุบันมีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว ส่วนอีกประเภทหนึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น การใช้ถ่านหินในการเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวจะได้เถ้าที่มีลักษณะทางเคมีที่มี

สารประกอบซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วันและทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 \text{ ---> } C\text{-}S\text{-}H$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 \text{ ---> } C\text{-}A\text{-}H$$

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุปอซโซลานที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในงานคอนกรีตควรลักษณะเป็นฝุ่นผงมีความละเอียดสูง เมื่อนำไปใช้ผสมคอนกรีตมีผลทำให้เกิดพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลดีต่อกำลังอัดของคอนกรีต (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) หรือเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทำให้มีความพรุนต่ำ ความทึบน้ำสูง ป้องกันการซึมผ่านของสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อเนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

การใช้วัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ โดยวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในประเทศไทย ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบ และวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้เถ้าแกลบมาผสมกับเถ้าถ่านหินเนื่องจากเถ้าแกลบมีจำนวนมาก หาได้ง่ายในประเทศไทย อีกทั้งยังมีราคาถูก ซึ่งคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินและแกลบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.3 เถ้าถ่านหิน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง ประมาณวันละกว่า 40,000 ตัน การเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะได้เถ้าลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้จะเป็นเถ้าถ่านหินประมาณ 6,000 ตัน ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณมากจึงได้นำเถ้าถ่านหินมาวิเคราะห์คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยจากการวิเคราะห์พบว่าเถ้าถ่านหินสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

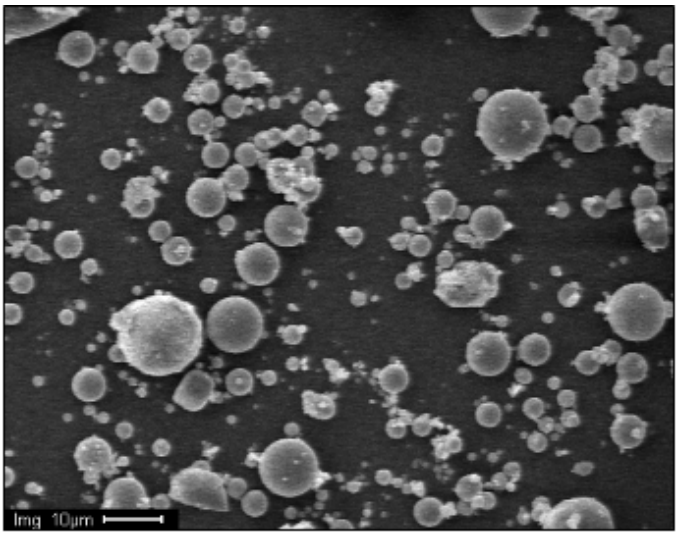
2.3.1 คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งสารนี้เป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือ ซิลิกา และ อะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้วสารปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าสารปอซโซลานมีความละเอียดมากๆ และมีน้ำเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียม โฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติยึดประสาน

เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลม มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 มิลลิเมตร) ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (AI_20_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_20_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C 618

2.3.2 คุณสมบัติของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการทดสอบ

เถ้าถ่านหินมีสีน้ำตาลแดงและมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าถ่านหินจากภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 2.2 เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีทรงกลมและผิวเรียบและเถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ที่เกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

เถ้าเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ใช้นี้มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดและมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอนโดยความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาโดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงการพัฒนากำลังอัดในมอร์ต้าร์จะเร็วขึ้น เพราะความละเอียดสูงก็หมายถึง มีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) เมื่อรวมตัวกันกับสารประกอบอื่นๆ ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตส่งผลให้เกิดความแข็งแรงมอร์ต้าร์

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (Chalee et al., 2010)

ร้อยละของสารประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	
Silicon Dioxide, SiO_2	35.20
Aluminum Oxide, Al_2O_3	19.20
Iron Oxide, Fe_2O_3	17.81
Calcium Oxide, CaO	16.65
Magnesium Oxide, MgO	0.00
Sodium Oxide, Na_2O	0.63
Potassium Oxide, K_2O	2.44
Sulfur Trioxide, SO_3	2.32
Loss On Ignition, LOI	0.15

2.4 เถ้าแกลบ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547 ; อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการสีข้าวเปลือก มีลักษณะสีเหลืองทอง หรือตามสายพันธุ์ข้าว แกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกมีประมาณร้อยละ 22 – 25 ของเมล็ดข้าวเปลือก และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักแกลบ เช่น ในกระบวนการผลิตข้าวเปลือก 1000 กิโลกรัมจะได้เถ้าแกลบ 50 กิโลกรัม ดังนั้นในแต่ละปีจะมีปริมาณเถ้าแกลบโดยประมาณ 1.63 ล้านตัน ซึ่งการกำจัดเถ้าแกลบจำนวนมากจะก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องมลภาวะเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้นำเถ้าแกลบมาศึกษาหาคุณสมบัติต่างๆเพื่อที่จะได้นำไปใช้ประโยชน์ อีกทั้งยังเป็นการกำจัดปัญหาของเถ้าแกลบอีกด้วย การศึกษาหาคุณสมบัติของเถ้าแกลบเพื่อจะนำไปใช้ประโยชน์ จำเป็นจะต้องทราบรายละเอียดต่างๆ เช่น ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ ความละเอียดของเถ้าแกลบ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ และ การเผาและชนิดของเถ้าแกลบ

2.4.1 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบนั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเผา เถ้าแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบที่เผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9 - 2.3 และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาเถ้าแกลบ ถ้าเผาที่อุณหภูมิประมาณ 500 ºC มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มเป็น 2.20 และ 2.30 ที่อุณหภูมิ 800 และ 1000 ºC ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะเนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนลดน้อยลง (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

2.4.2 ความละเอียดของเถ้าแกลบ

การวัดขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่นิยมใช้เป็นการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยความละเอียดของเถ้าแกลบนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับเวลา และวิธีในการบดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับวิธีการเผาอีกด้วย เช่น เผาที่อุณหภูมิ 500 ºC จะได้เถ้าแกลบที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากการเป็นผลึกจะทำลายโครงสร้างเซลล์ที่มีความพรุน โดยเถ้าแกลบส่วนใหญ่ที่ใช้จะมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 5–20 ไมครอน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

2.4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าเถ้าแกลบนั้นมีผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 90 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 0.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 3.7 และมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งไม่เกินค่าที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ ดังนั้นแกลบจึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

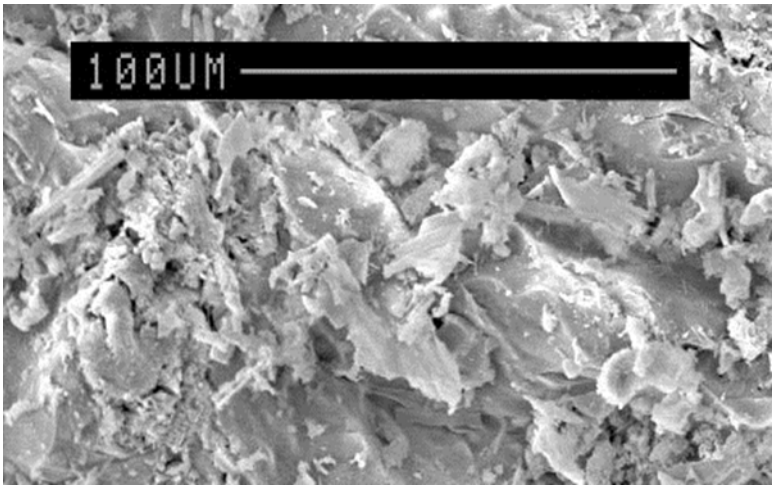
สารประกอบ	เถ้าแกลบ [1]	เถ้าแกลบเทาขาว [2]	เถ้าแกลบดำโรงสี [2]
SiO_2	86.9 - 97.3	88.3	89.9
Al_2O_3	NA	0.4	0.5
Fe_2O_3	0 – 0.6	3.3	1.8
CaO	0.2 - 1.5	0.5	0.5
K_2O	0.6 - 2.5	2.7	1.4
Na_2O	0 – 1.5	0.1	0.1
MgO	0.1 - 1.9	0.2	0.2
SO_3	0.1 - 1.1	0.1	0.1
LOI	NA	3.7	3.7

2.4.4 การเผาและชนิดของเถ้าแกลบ

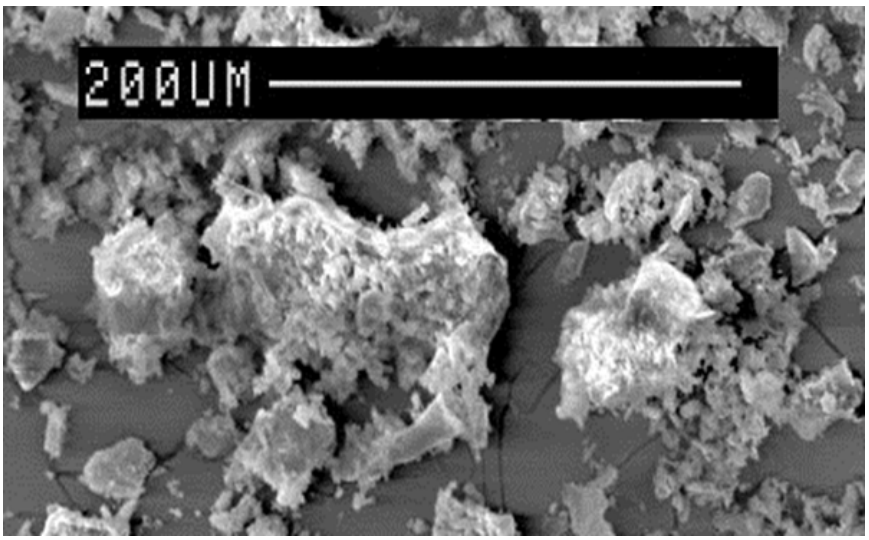
เมื่อทำการให้ความร้อนแก่แกลบ แกลบจะเกิดการสูญเสียความชื้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการเผาไหม้ และถ้ามีอากาศเพียงพอแกลบจะกลายเป็นเถ้าสีขาว แต่ถ้าเผาแกลบในที่ที่มีอากาศไม่เพียงพอจะได้แกลบที่มีสีดำและมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูง แม้จะเผาที่อุณหภูมิที่สูงๆนอกจากนี้ยังต้องบดให้ละเอียดอย่างมากจึงจะนำมาใช้ผสมทำปูนซีเมนต์ได้

แกลบที่ผ่านการเผาที่สมบูรณ์จะมีค่า LOI ต่ำ และมีซิลิกาสูงแต่ก็ยังไม่แน่นอนว่าจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบจะขึ้นอยู่กับสถานะของซิลิกา ซึ่งมีอยู่ 2 สถานะคือ อสัณฐาน (amorphous) และผลึก (crystalline) ทั้งนี้ขึ้นอยู่

กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผา ซิลิกาที่เป็นผลึกค่อนข้างอยู่ตัวและเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่ซิลิกาที่เป็นอสัณฐานซึ่งได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) โดยรูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงภาพถ่ายขยายผิวของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผา และภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบที่บดละเอียด ตามลำดับ ชนิดของเถ้าแกลบโดยทั่วไปเถ้าแกลบมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียด มีสีที่แตกต่างกันหลายสีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาแบ่งได้เป็น 2 สี คือ เถ้าแกลบดำและเถ้าแกลบเทาขาว



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายขยายผิวของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผา (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบที่บดละเอียด (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล , 2547)

เถ้าแกลบดำ ได้มาจากการเผาแกลบเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ (boiler) ในโรงสีเรียกแกลบนี้ว่า แกลบดำโรงสี (black boiler ash) อุณหภูมิของการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีไม่คงที่ขึ้นอยู่กับวิธีการป้อนแกลบ ช่วงเวลาการเผา และขนาดของเตาเผา อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 800 ºC และอาจสูงถึง 1200 ºC ช่วงเวลาของการเผาไม่นานนัก คุณสมบัติของแกลบที่ได้จากการเผาโดยวิธีนี้มีความแตกต่างกันมาก โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเผา ถ้าเผาช่วงเวลาสั้นแกลบที่ได้จะผ่านการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมี LOI สูง ส่วนมากแกลบดำมี LOI ต่ำสามารถนำมาบดและผสมเป็นปูนซีเมนต์ปอซโซลานทำคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงที่ดีได้

เถ้าแกลบเทาขาว ส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาในทีโล่งหรือในเตาขนาดเล็ก อุณหภูมิในการเผาขึ้นอยู่กับขนาดของกองแกลบ ถ้าเป็นกองใหญ่มากอุณหภูมิอาจสูงถึง 1200 ºC แต่ถ้าเป็นเตาขนาดเล็กอุณหภูมิอาจสูงเพียง 550 ºC ถ้าเผาโดยกองติดดิน การเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ มี LOI สูง เนื่องจากอากาศไม่สามารถเข้าไปช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีได้ เมื่อเผาเสร็จแล้วการเก็บเถ้าแกลบก็สามารถทำได้ยากและมักจะมีสิ่งเจือปนเช่น เศษดินและหินติดมาด้วย นอกจากนี้การเผาในที่มีลมจะทำให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายอีกด้วย เถ้าแกลบที่ได้จะมีสีเทาขาวและสามารถใช้ทำเป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี

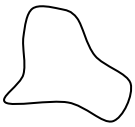
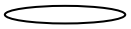
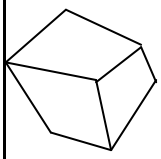
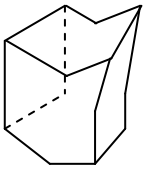
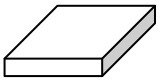
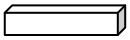
2.5 มวลรวม

มวลรวมเป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งในคอนกรีตที่ทำหน้าที่รับแรงโดยความสามารถในการรับแรงจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวมทั้งที่ได้มาจากคุณสมบัติจากต้นกำเนิดและคุณสมบัติประจำตัวของมวลรวม เช่น รูปร่างและขนาด ลักษณะเนื้อ และปริมาณความชื้น คุณสมบัติของมวลรวมมีความสำคัญต่อการออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพตามต้องการ โดยคุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงมากคือ ความสามารถทำงานได้ (workability) กำลังและความคงทน

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมที่ดีสำหรับใช้ผสมคอนกรีต มวลรวมก้อนกลมและผิวเรียบต้องการซีเมนต์เพสต์เพื่อเคลือบผิวน้อยกว่ามวลรวมรูปร่างอื่น นอกจากนี้ยังมีการขัดกันระหว่างก้อนมวลรวมต่ำ ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีซึ่งมวลรวมเหล่านี้ได้แก่ กรวดและทรายตามธรรมชาติเพราะส่วนมากมีลักษณะกลมและผิวเรียบ สำหรับหินย่อยที่ได้มาจากการย่อยหินที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงตามต้องการมีลักษณะเป็นเหลี่ยมและส่วนมากผิวหยาบมวลรวมก้อนเหลี่ยมและผิวหยาบมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้ต้องการซีเมนต์เพสต์มาเคลือบผิวมากขึ้น และความเป็นเหลี่ยมยังทำให้เกิดการขัดกันระหว่างก้อนมวลรวมทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ต่ำ รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมละเอียดมีความสำคัญต่อความต้องการน้ำของส่วนผสมมาก มวลรวมละเอียดที่มีช่องว่างอยู่มากจะมีการดูดน้ำมากทำให้ส่วนผสมคอนกรีตต้องการน้ำสูงขึ้น รูปร่างและลักษณะผิวมีผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยเฉพาะคอนกรีตกำลังสูง มวลรวมก้อนเหลี่ยมและผิวหยาบมีพื้นที่ผิวสูง ดังนั้นจึงมีพื้นที่สำหรับการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น และทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้นด้วย โดยรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะรูปร่างของมวลรวมในลักษณะต่างๆ

ในเนื้อของมวลรวมมีช่องว่างเล็กๆ ที่น้ำสามารถไหลเข้าหรือออกได้ นอกจากนี้น้ำยังสามารถเกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดน้ำได้ มวลรวมที่กองเก็บในสถานที่ต่างกันจะมีปริมาณน้ำต่างกัน ปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลรวมมีผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต กล่าวคือ มวลรวมในสภาวะแห้งสามารถดูดน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเข้าไปในมวลรวมบางส่วน ทำให้น้ำที่เหลือในส่วนผสมน้อยกว่าที่ต้องการ ในทางกลับกันถ้ามวลรวมมีน้ำมากเกินไปคืออยู่ในสภาวะเปียกชื้น น้ำส่วนเกินจะทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่าที่ต้องการ สภาวะความชื้นของมวลรวมแบ่งได้เป็น 4 แบบ คือ แห้งด้วยเตาอบ (oven dry) เป็นการขจัดความชื้นออกจากมวลรวมจนหมดด้วยความร้อนจากเตาอบ แห้งในอากาศ (air dry) มวลรวมมีผิวแห้ง แต่เนื้อภายในที่ลึกจากผิวมีน้ำเหลืออยู่บ้าง อิ่มตัวผิวแห้ง (saturated surface dry, SSD) ผิวของมวลรวม

แห้งแต่ภายใต้ผิวอยู่ในสภาพอิ่มตัวมีน้ำอยู่เต็ม และผิวเปียก (wet) มีน้ำคลุมผิวโดยรอบ และภายใต้ผิวมีน้ำอยู่เต็ม

1. Shape	Chunky		Platelike Flaky	Needlelike Elongated
	Irregular	Highly Irregular		
Round รูปร่างกลม				
Cubical เป็นเหลี่ยม				

รูปที่ 2.5 ลักษณะรูปร่างของมวลรวม (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้างในประเทศไทยส่วนใหญ่เน้นที่ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุปอซโซลานที่มีในประเทศ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เป็นต้น โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้เร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของด่างที่ใช้ชะเอาซิลิกาและอะลูมินา ปริมาณของเหลวต่อของแข็ง อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่เกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในประเทศไทยยังมีน้อย และยังไม่พบการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถยืนยันการนำไปใช้งานได้มากขึ้น โดยงานวิจัยวัสดุจีโอพอลิเมอร์บางส่วนมีดังนี้

บุรฉัตร ฉัตรวีระ (2555) ได้ศึกษา สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยและเถ้าแกลบ: อิทธิพลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ ผลการศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง นอกจากนั้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ซึ่งประกอบด้วยเถ้าลอยล้วนมีกำลังอัดสูงสุดทั้งกรณีการบ่มในเตาอบและพลังงานไมโครเวฟ และพบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสม

Yun Yong Kim et al. (2014) ได้ศึกษาสมบัติด้านความคงทนและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 7, 8, 9 และ 10 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นและบ่มมอร์ต้าร์นานขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์สูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนั้นพบว่า การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามความเข้มของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น

Detphan and Chindaprasirt (2009) ได้ศึกษาการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินผสมกับเถ้าแกลบ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 0/100, 20/80, 40/60, และ 60/40 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดที่ได้จากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบผสมกับเถ้าถ่านหินอยู่ในช่วง 12.5-56.0 MPa โดยขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบต่อเถ้าถ่านหิน และความละเอียดของเถ้าแกลบ การใช้อัตราส่วนของ sodium silicate/NaOH เท่ากับ 4.0 และบ่มที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชม. ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินสูงสุด

นอกจากนั้น ได้มีการศึกษาการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินซึ่งพบว่า เถ้าถ่านหินสามารถใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ดี โดยให้ผลที่คล้ายกับจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบ โดย Chindaprasirt and Chalee (2014) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ส่งผลให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กลง ตลอดจนทำให้การพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า นอกจากนั้นพบว่า ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

นอกจากนั้น สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ (2552) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำเป็นส่วนผสม จากการศึกษาพบว่า การรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้าถ่านหินลงก็จะได้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น

ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ คณะ (2552) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม (2555) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก และในเถ้าแกลบมีปริมาณของซิลิกาค่อนข้างสูง จึงน่าจะพัฒนาเป็นวัสดุประสานจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำได้ อย่างไรตามการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบยังจำเป็นต้องหาอลูมิน่าจากแหล่งอื่นเนื่องจากเถ้าแกลบเองมีอลูมิน่าต่ำมาก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้เถ้าถ่านหินเป็นแหล่งให้สารประกอบอลูมิน่ากับวัสดุจีโอพอลิเมอร์

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

สำหรับบทนี้กล่าวถึงรายละเอียด ขั้นตอนการเตรียม ของวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ อัตราส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงจากขนาดความละเอียดของเถ้าแกลบและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตลอดจนวิธีการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบดำใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าแกลบได้จากโรงงานโดยตรง (O) เถ้าแกลบบดหยาบ (M) และเถ้าแกลบบดละเอียด (F) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34, และ 30 ตามลำดับ

a.) เถ้าแกลบไม่บด ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 48 (OR)

b.) เถ้าแกลบบดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 34 (MR)

c.) เถ้าแกลบบดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 29 (FR)

รูปที่ 3.1 เถ้าแกลบที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.61 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.57 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.55 เป็นมวลรวมละเอียด (รูปที่ 3.2)

รูปที่ 3.2 มวลรวมละเอียด

3.1.3 มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบใช้เป็นหินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. (หินเบอร์ ¾ นิ้ว) มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.72 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.44 และโมดูลัสรวมเท่ากับ 7.45 (รูปที่ 3.3)

รูปที่ 3.3 มวลรวมหยาบ

3.1.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

เกรดของโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการทดลองคือ 49-50 ความถ่วงจำเพราะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียล (รูปที่ 3.4)

รูปที่ 3.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.1.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ทำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นแบบชนิดเกร็ด มีความบริสุทธิ์ของ NaOH เท่ากับ 99% ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ (รูปที่ 3.5)

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จากสมการ

$$m = M \times Molar$$

โดยที่ m คือ น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)

M คือ มวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

Molar คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)

2. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ตามปริมาณที่คำนวณมา
3. แบ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำจนให้มีปริมาตรรวมกันทั้งหมด 1 ลิตร โดยเก็บสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในภาชนะที่เป็นพลาสติก

รูปที่ 3.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเครื่องลอสแองเจิลลิส ลูกเหล็กทรงกลมตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 46.8 มม. ครกหิน เตาอบ เครื่องทดสอบกำลังอัด universal testing machine (UTM) เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 ก. และ 0.002 กก. ตะแกรงร่อนเบอร์ ¾" 30 และเบอร์ 325 ช้อนผสม อ่างผสม แบบหล่อขนาด 100x100x100 มม^2 แท่งกระทุ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. เกรียง และค้อน (รูปที่ 3.6)

a.) เครื่องลอสแองเจิลลิส

b.) ลูกเหล็ก

c.) ครกหิน

d.) เตาอบ

e.) เครื่องทดสอบกำลัง

f.) เครื่องชั่งละเอียด 0.01 g

g.) เครื่องชั่งละเอียด 0.002 kg

h.) ตะแกรงร่อน เบอร์ ¾"

i.) ตะแกรงร่อน เบอร์ 30

j.) ตะแกรงร่อน เบอร์ 325

k.) ช้อนและอ่างผสม

l.) แบบหล่อ

m.) แท่งกระทุ้ง

n.) เกรียง

o.) ค้อน

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช่ในการทดลอง

3.3 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ออกแบบส่วนผสมโดยกำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/S) เท่ากับ 0.9 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบเป็น 9:1 ความละเอียดของเถ้าแกลบ 3 ขนาด ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ รายละเอียดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ส่วนผสม	สัดส่วนผสม (กก/ม^3)							
	เถ้าถ่านหิน	เถ้าแกลบดำ			มวลรวม		NS	NaOH (Molar)
		O	M	F	ทราย	หิน		
O12M	360	40			585	1055	258	103.5 (12)
O14M	360	40			585	1055	258	103.5 (14)
O16M	360	40			585	1055	258	103.5 (16)
O18M	360	40			585	1055	258	103.5 (18)
M12M	360		40		585	1060	258	103.5 (12)
M14M	360		40		585	1060	258	103.5 (14)
M16M	360		40		585	1060	258	103.5 (16)
M18M	360		40		585	1060	258	103.5 (18)
F12M	360			40	585	1065	258	103.5 (12)
F14M	360			40	585	1065	258	103.5 (14)
F16M	360			40	585	1065	258	103.5 (16)
F18M	360			40	585	1065	258	103.5 (18)

หมายเหตุ NS = สารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.4 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 9:1 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้ปริมาณของอลูมินาและซิลิกาไม่น้อยกว่าเถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าแกลบไม่บด (O) เถ้าแกลบบดหยาบ (M) และเถ้าแกลบบดละเอียด (F) ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34, และ 30 ตามลำดับ ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/S) เท่ากับ 0.90 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และบ่มตัวอย่างในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบจนถึงอายุทดสอบ โดยทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มเป็นเวลา 7, 14, 28, และ 60 วัน การเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.7 และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแข็งตัวที่บ่มในอากาศแสดงดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.7 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 3.8 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแข็งตัวที่บ่มในอากาศ

บทที่ 4
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และผลของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

4.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าแกลบไม่บด (O) เถ้าแกลบบดหยาบ (M) และเถ้าแกลบบดละเอียด (F) ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34, และ 30 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบของทั้ง 3 ขนาด เท่ากับ 2.07, 2.08 และ 2.12 ตามลำดับ ลักษณะของเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีสีดำ ผิวขรุขระ ดังรูปที่ 4.1 (ก) และเมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าแกลบจากรูปภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.1(ข) จะเห็นได้ชัดว่าลักษณะของเถ้าแกลบมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมมุมและมีผิวขรุขระไม่เรียบ ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีสีเทา ดังรูปที่ 4.2 (ก) และเมื่อขยายด้วยเครื่อง SEM ดังรูปที่ 4.2 (ข) พบว่า มีอนุภาคกลม ตัน ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพที่ดีของเถ้าถ่านหินที่จะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลาน หรือ โพลิเมอร์ไรท์เซชั่นได้ดี

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีปริมาณของ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 90 ส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก และเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.21 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำและเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.1

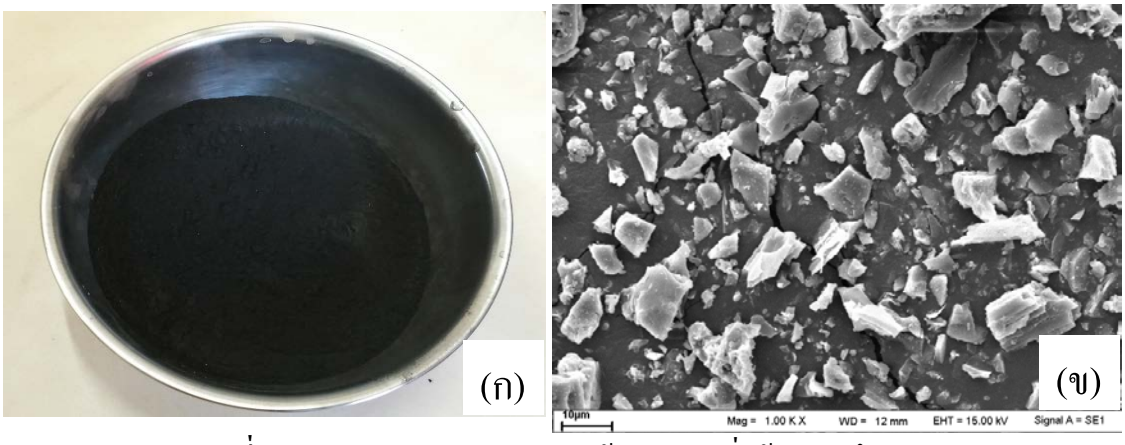
ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/S) เท่ากับ 0.90

มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.61 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.57 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.55 เป็นมวลรวม

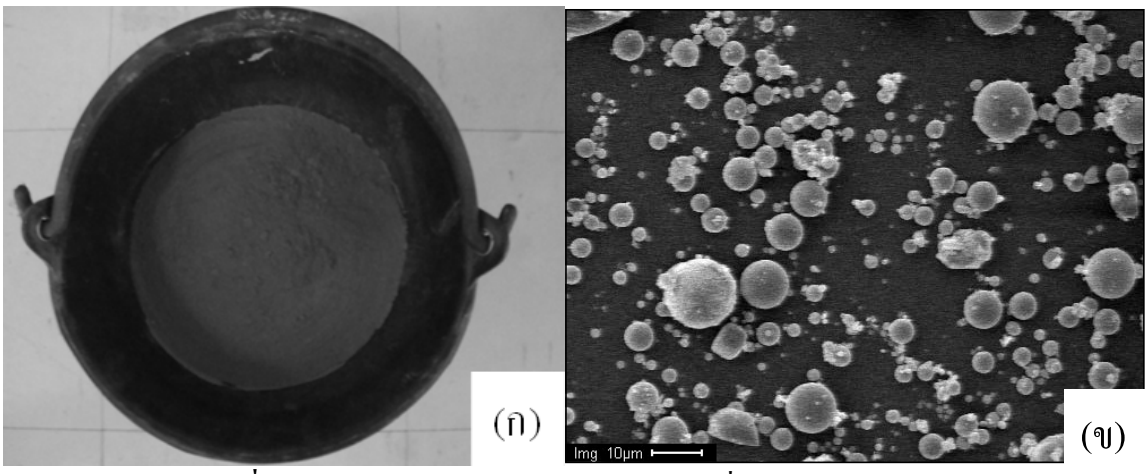
ละเอียด ส่วนมวลรวมหยาบใช้เป็นหินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. (หินเบอร์ ¾ นิ้ว) มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.72 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.44 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.45

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	
	เถ้าแกลบดำ (RHA)	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon dioxide, SiO_2	90.0	35.20
Aluminum oxide, Al_2O_3	0.51	19.20
Iron oxide, Fe_2O_3	2.02	17.81
Calcium oxide, CaO	0.52	16.65
Magnesium oxide, MgO	0.22	-
Sulfur trioxide, SO_3	1.50	0.63
Other oxides	-	2.44
LOI.	4.71	1.5



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษา

4.2 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

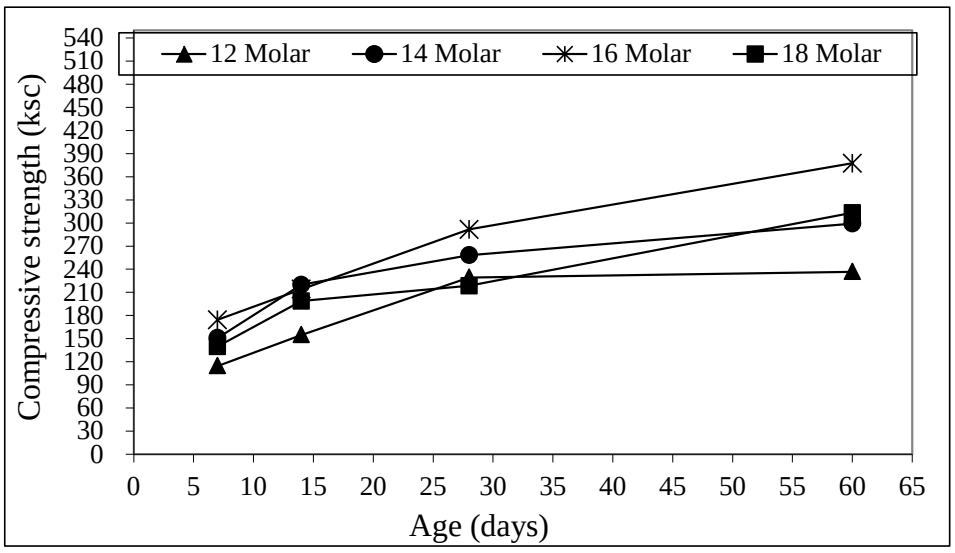
การทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ค่า และทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในอากาศเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน ได้แสดงกำลังอัดที่อายุบ่มต่างๆในตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุที่บ่มในอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่ใช้เถ้าแกลบไม่บด (O) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 48), เถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) และเถ้าแกลบบดละเอียด (F) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30) พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่สูงในช่วง 14 วันแรก และลดลงเล็กน้อยในช่วงอายุบ่ม 14 ถึง 28 วัน (สังเกตจากความชันของกราฟ) ส่วนที่อายุบ่มในช่วง 28 ถึง 60 วัน พบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีอัตราการเพิ่มตามระยะเวลาบ่มที่ลดลง กำลังอัดที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น (Rattanasak, and Chindaprasirt, 2009 ; Chindaprasirt et al., 2009) ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงต้นของอายุทดสอบค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินสูงในช่วง 14 วันแรก ส่วนในช่วง 28 ถึง 60 วัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน มีแนวโน้มลดลงโดยสอดคล้องกับอัตราการเพิ่มของกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่มีแนวโน้มลดลงในช่วงระยะเวลาดังกล่าวด้วย โดยผลดังกล่าวมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความละเอียดของเถ้าแกลบดำ ดังรูปที่ 4.3(ก) ถึง 4.3(ค)

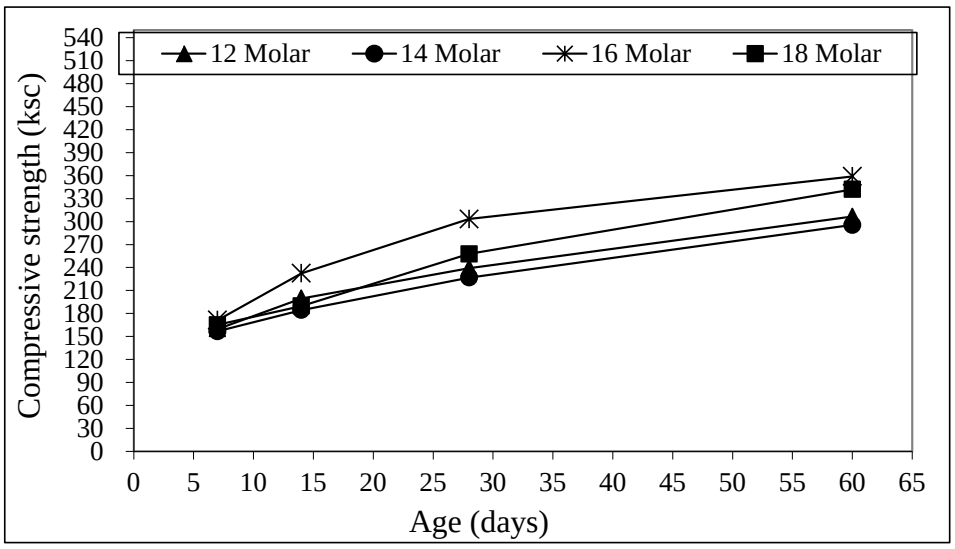
การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงกว่า ส่งผลให้อัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 14 วันแรกสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำกว่า โดยสังเกตจากความชันของกราฟในช่วง 14 วันแรกของกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียด (F) ตามรูปที่ 4.3(ค) มากกว่ากลุ่มอื่นค่อนข้างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันเกิดขึ้นในช่วง 14 วันแรกสูง โดยสารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบที่มีความละเอียดได้มากกว่าเถ้าแกลบอนุภาคหยาบ และเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในช่วง 14 วันแรกมีอัตราการเพิ่มค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน พบว่า การใช้เถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง (O) และเถ้าแกลบบดหยาบ (M) ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน สูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง (O) และใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน เท่ากับ 207, 198, 216 และ 224 ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน ลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ช่วยชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบที่อนุภาคหยาบได้ดีขึ้น และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาวได้ ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงพบว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน ค่อนข้างสูงอยู่แล้ว จึงทำให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน

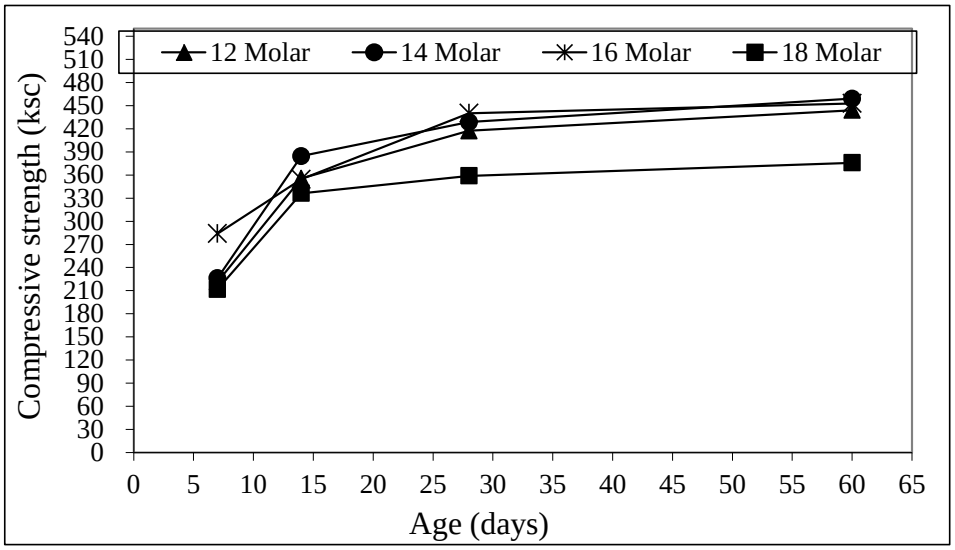
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม^2)				ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วันเทียบกับอายุ 7 วัน
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	
O12M	115	155	229	237	207
O14M	151	220	258	299	198
O16M	174	214	292	377	216
O18M	140	199	219	313	224
M12M	160	200	239	306	192
M14M	157	184	227	296	189
M16M	171	233	303	359	209
M18M	165	190	258	342	207
F12M	222	356	417	444	200
F14M	226	385	429	459	203
F16M	284	355	440	453	160
F18M	212	336	359	376	177



ก) เถ้าแกลบไม่บด (O) ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 48



ข) เถ้าแกลบบดหยาบ (M) ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34



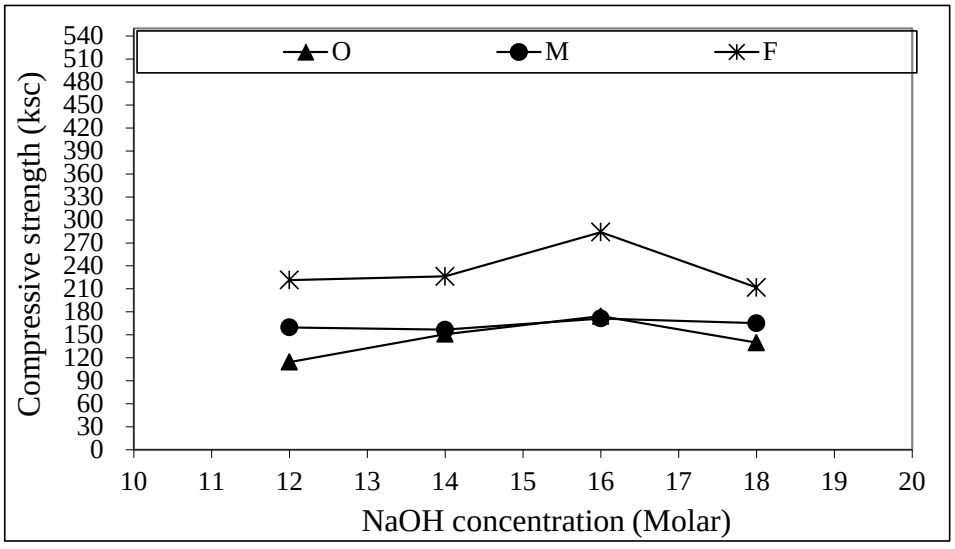
ค) เถ้าแกลบบดละเอียด (F) ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุที่บ่มในอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน

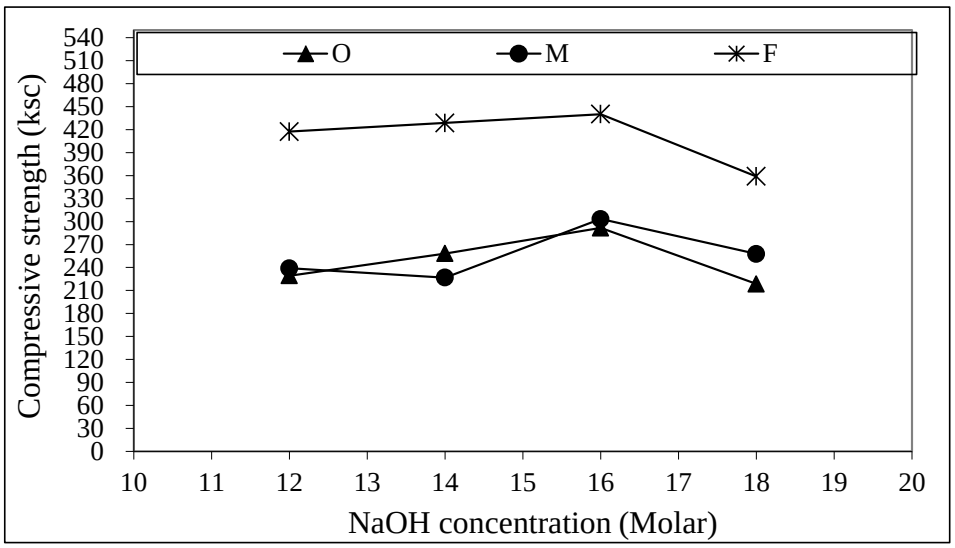
4.3 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุบ่มในอากาศ 7, 28 และ 60 วัน ดังรูปที่ 4.4(ก), 4.4(ข) และ 4.4(ค) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามความ

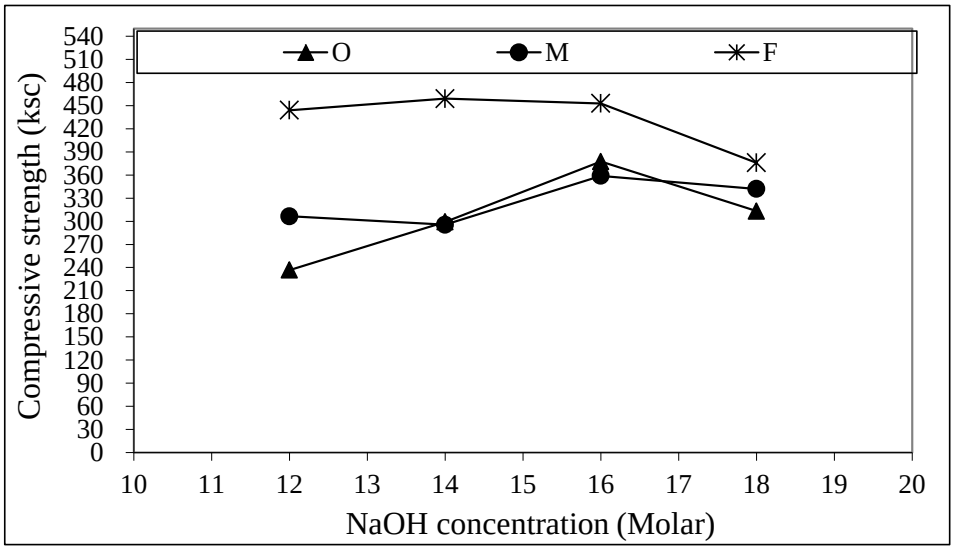
เข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรงและใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 229, 258, 292 และ 219 กก/ซม^2 ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกส่วนผสมและทุกอายุทดสอบ ดังรูปที่ 4.4(ก), 4.4(ข) และ 4.4(ค) การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น อาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันได้ดีขึ้น และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ (Chindaprasirt et al., 2009 ; Hanjitsuwan et al., 2009) นอกจากนั้น การศึกษาที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) พบว่า การชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงมากกว่า 15 โมลาร์ ซึ่งอาจมีผลทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์



ก) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 7 วัน



ข) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 28 วัน



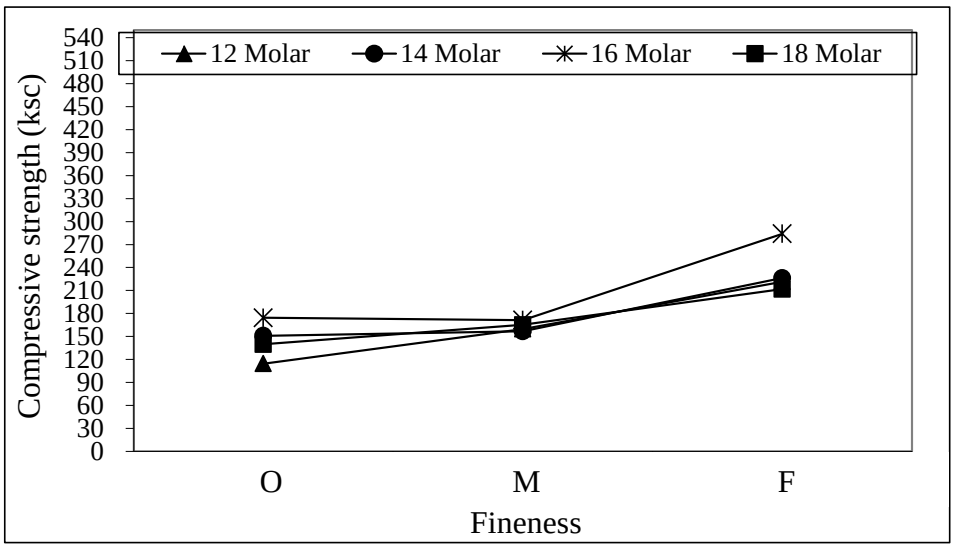
ค) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 60 วัน

รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลัง อัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน

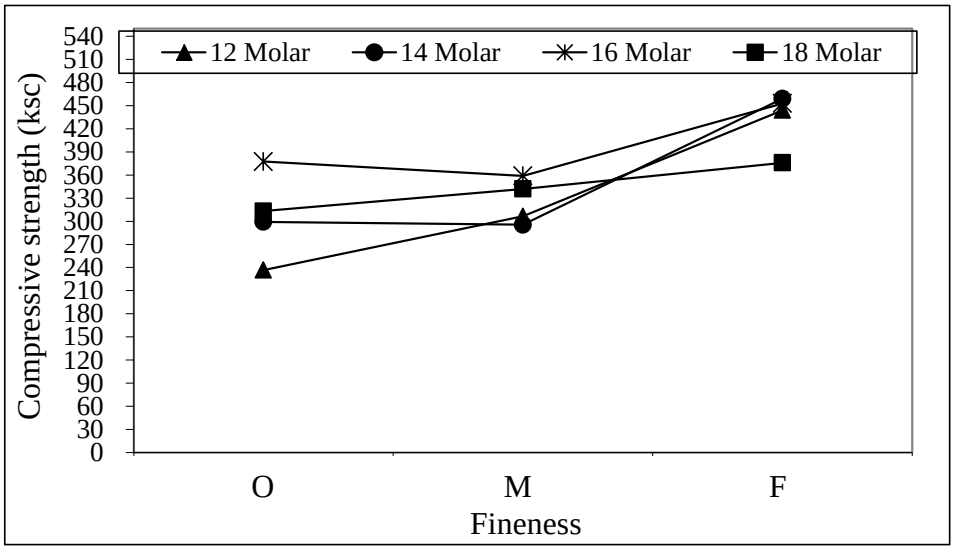
4.4 ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 7 และ 60 วัน ดังรูปที่ 4.5(ก) และ 4.5(ข) ตามลำดับ พบว่า การใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดมากขึ้นให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

สูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งอายุต้น (7 วัน) และอายุปลาย (60 วัน) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นชัดเจนว่า สารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นได้มากกว่าเถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำกว่า (Shalini et al., 2016) โดยเป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้เถ้าแกลบที่เพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) ไปเป็นเถ้าแกลบบดละเอียด (F) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30) ให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นชัดเจนมากกว่าเถ้าแกลบที่เพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง (O) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 48) ไปเป็นเถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) นอกจากนั้นพบว่า การใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำ มากกว่าความเข้มข้นสูง โดยผลดังกล่าวมีความชัดเจนมากขึ้นที่อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูง มีลักษณะทางกายที่ดีและส่งผลให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันเกิดขึ้นได้ดีอยู่แล้ว ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบที่มีอนุภาคหยาบกว่าจำเป็นต้องใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงจึงจะสามารถชะเอาซิลิกาได้ดี ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น จึงมีบทบาทสำคัญกับเถ้าแกลบที่มีอนุภาคหยาบมากกว่าเถ้าแกลบละเอียด การศึกษาในครั้งนี้มีการใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น ซึ่งกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตส่วนหนึ่งมาจากซิลิกาและอลูมินาที่ชะออกมาจากเถ้าถ่านหิน ส่วนกำลังอัดที่เป็นผลจากเถ้าแกลบสังเกตได้จากการเพิ่มความละเอียดมากขึ้นกำลังอัดสูงขึ้น เช่น การเพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบที่ไม่บด(O) เป็นเถ้าแกลบที่บดละเอียด (F) ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 12 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดที่อายุ 60 วัน เพิ่มขึ้น ถึง 207 กก/ซม^2 (เพิ่มจาก 237 กก/ซม^2 ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต O12M เป็น 444 กก/ซม^2 ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต F12M) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ซิลิกาในเถ้าแกลบมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้จะใช้ปริมาณต่ำกว่าเถ้าถ่านหินค่อนข้างมากก็ตาม



ก) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 7 วัน



ข) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 60 วัน

รูปที่ 4.5 ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 การใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินมีค่ามากขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนเมื่อเพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) ไปเป็นเถ้าแกลบบดละเอียด (F) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30)

5.1.2 การใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง โดยผลดังกล่าวมีความชัดเจนมากขึ้นที่อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น

5.1.3 การใช้สารละลาย NaOH ทีมีความเข้มข้นสูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้สารละลาย NaOH ทีมีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างโดยแทนปูนซีเมนต์ทั้งหมด ควรศึกษาตัวแปรอื่นๆเพิ่มเติม เช่น ชนิดของด่างที่ใช้ทำปฏิกิริยา แหล่งของเถ้าแกลบที่ต่างกัน อุณหภูมิบ่มที่ต่างกัน อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบและของเหลว เป็นต้น และควรมีการศึกษาวัสดุนี้โดยใช้เถ้าแกลบขาวเป็นสารตั้งต้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมนา และ วิเชียร ชาลี. (2553). กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน, *Burapha Sci.,* J.15 (1) หน้า 13-22

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ณัฏฐ์ มากุล. (2555). สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยและเถ้าแกลบ: อิทธิพลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.* 35 (3), หน้า 299-310

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต*. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย

ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). *เถ้าลอยในงานคอนกรีต*, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย

Panha Huy, Soklam Mov และ วิเชียร ชาลี. (2559). การผลิตคอนกรีตบล็อค ชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 21(2), หน้า 31-46

ณัฐพัชร์ ผาติไตรวัฒน์ และ วิเชียร ชาลี. (2560). ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 40(3), หน้า 355-364

วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม. (2555). การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 35(2), หน้า 157-170

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ. (2552). จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ, *การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1831-1836

สุรพันธ์ สุคันธปรีย์, จตุพล ตั้งปกาศิต, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2546). การศึกษาคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสม. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา* 14(3), หน้า 1-7

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2552). *เถ้าแกลบในงานคอนกรีต*, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจธ.*, 29(4), หน้า 437-446.

ASTM C311 / C311M, (2017). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02.

ASTM C618 - 17, (2017). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02.

Chalee, W., Ausapanit, P., and Jaturapitakkul, C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design*, 31, pp. 1242-1249.

Chalee, W., Sasakul, T., Suwanmaneechoand, P., and Jaturapitakkul, C. (2013). Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 47-53.

Cheewaket, T., Jaturapitakkuland, C. and Chalee, W. (2014). Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site. *Materials and Structures*, 47, pp. 1501–1511.

Chindaprasirt, P. and Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 303–310.

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

Detphan, S. and Chindaprasirt, P. (2009). Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. International Journal of Minerals, *Metallurgy and Materials*, 16(6), pp. 720–726.

Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45,pp. 9-14.

Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng*, 22, pp. 1073-1078.

Somna, R., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanachu, P. (2012). Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate. *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, pp. 16-22.

Sata, V., Jaturapitakkuland, C. and Kiattikomo, K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1589–1598.

Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C and Chindaprasirt, P. (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34, pp. 94 -100.

Shalini, A., Gurunarayanan, G., Arun kumar, R., Jaya prakash, V., and akthivel, S. (2016). Performance of rice husk ash in geopolymer concrete. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2, pp. 2349-6010.

Yun Yong Kim, Byung-Jae Lee, Velu Saraswathy, Seung-Jun Kwon. (2014). Strength and Durability Performance of Alkali-Activated Rice Husk Ash Geopolymer Mortar. *The Scientific World Journal*; Article ID 209584.

Zain, M.F.M., Islam, M.N., Mahmud, F., and Jamil, M. (2011). Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 798-805.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความประกอบการประชุมสัมนาทางวิชาการระดับชาติ

1) เทียง ชีวะเกตุ, น้าผึ้ง มะรังศรี, ศาตญา นาคะปักษิณ และ วิเชียร ชาลี(2560). "ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำ". การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22. นครราชสีมา. หน้า 187-192

ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำ

Effects of Black Rice Husk Ash Fineness and NaOH Concentration on the Compressive Strength of Black Rice Husk Ash Blended Fly Ash-Based Geopolymer Concrete

เที่ยง ชีวะเกตุ[1] น้ำผึ้ง มะรังศรี[2] ศาตญา นาคะปักษิณ[3] และ วิเชียร ชาลี[4,*]

[1, 2, 3, 4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบดำเท่ากับ 9:1 โดยน้ำหนัก ใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าแกลบดำไม่บด (O) เถ้าแกลบดำบดหยาบ (M) และเถ้าแกลบดำบดละเอียด (F) ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34 และ 30 ตามลำดับ ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/S) เท่ากับ 0.90 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และบ่มตัวอย่างในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบ ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความละเอียดของเถ้าแกลบดำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้เถ้าแกลบดำไม่บดอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉลี่ยถึงร้อยละ 60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นในช่วง 12 - 16 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีกำลังอัดสูงสุดที่ความเข้มข้น 16 โมลาร์และกำลังอัดลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเท่ากับ 18 โมลาร์ นอกจากนี้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้นตามอายุทดสอบและมีแนวโน้มการพัฒนาที่สูงในช่วงอายุต้น

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต, เถ้าแกลบดำ, เถ้าถ่านหิน, ความเข้มข้นของสารสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, กำลังอัด

Abstract

This research studies to study the effects of black rice husk ash fineness and sodium hydroxide solution concentration on the compressive strength of geopolymer concrete made of black rice husk ash and fly ash at the ratio of 9:1 by weight of binder. The fineness of black rice husk ash were classified into original (O), medium (M), and fine (F) corresponding to their percent retained by weight on a #325 – sieve less than 48, 34, and 30, respectively. Sodium silicate solution (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide solution (NaOH) with various concentrations of 12, 14, 16, and 18 molar were conducted with the liquid and solid (L/S) of 0.90 in geopolymer concrete mixtures. Cube specimens of 100x100x100 mm. were removed from the molds after being cast for 24 hours and then were cured with plastic wrap before compressive strength tests at the curing ages of 7, 14, 28, and 60 days. The study found that compressive strength increase with rice husk ash fineness. On average, compressive strength of the specimens containing small particle size of black rice husk ash were significantly higher than those of original particle size by about 60 percent. The greater in concentration of NaOH ranging from 12 - 16 molar also raised up the compressive strength. The highest compressive strength was obtained at the concentration of 16 molar and then its strength decreased at the greater concentration of 18 molar. Moreover, the compressive strength increased with curing time and developed greatly during the early period.

Keywords: geopolymer concrete, black rice husk ash, fly ash, sodium hydroxide concentration, compressive strength

1. บทนำ

การศึกษาที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับว่าการใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต สามารถใช้งานได้ดี ทั้งสมบัติเชิงกลและความคงทนของคอนกรีต [1-3] งานวิจัยในปัจจุบันจึงได้ให้ความสนใจในการพัฒนาวัสดุประสานชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากเถ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถเป็นวัสดุปอซโซลานได้ เช่น เถ้าแกลบดำ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น ถึงแม้ว่าวัสดุปอซโซลานเหล่านี้จะให้ผลการศึกษาเบื้องต้นไปในทิศทางที่ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของอนุภาคที่หยาบเกินไป ทำให้ต้องมีการบดให้ละเอียดก่อนถึงจะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตได้ จึงทำให้วัสดุประสานที่ใช้เถ้าชีวมวลเหล่านี้ ยังไม่มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ ตลอดจนการใช้วัสดุปอซโซลานดังกล่าวยังจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม

แนวทางการพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่ โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่เรียกว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ จึงเป็นที่น่าสนใจในปัจุบัน สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์ จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมากและลดต้นทุนในการผลิต การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al โดยใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์พบว่า สามารถใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าชีวมวล (เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น) หรือใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก ซึ่งสามารถผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้มีกำลังที่อุณหภูมิห้องได้ การศึกษาที่ผ่านมา [4-6] พบว่า สมบัติของวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้เร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของด่างที่ใช้ชะเอาซิลิกาและอะลูมินา ปริมาณของเหลวต่อของแข็ง อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการขยายผลการศึกษา ตลอดจนแนวทางในการเลือกใช้วัสดุและกระบวนการผลิตคอนกรีตจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการศึกษาที่หวังผลเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ ควรเน้นถึงความเป็นไปได้ของการนำวัสดุเหลือทิ้งที่มีมากในประเทศมาใช้งาน โดยปัจจัยที่ศึกษาต้องสอดคล้องกับการนำมาใช้งานได้ง่าย ภายใต้การรับแรงเชิงกลของคอนกรีตที่เหมาะสม ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาแกลบในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเน้นในส่วนของเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรง และแปรเปลี่ยนความละเอียดของเถ้าแกลบที่ไม่ต้องบดให้ละเอียดมาก ทั้งนี้เพื่อต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำมาใช้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบดเถ้าแกลบที่สูง อย่างไรตาม การทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบยังจำเป็นต้องใช้อลูมินาจากแหล่งอื่น เนื่องจากเถ้าแกลบมีอลูมินาต่ำมาก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้เถ้าถ่านหินเป็นแหล่งให้สารประกอบอลูมินากับวัสดุจีโอพอลิเมอร์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าแกลบไม่บด (O) เถ้าแกลบบดหยาบ (M) และเถ้าแกลบบดละเอียด (F) ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34, และ 30 ตามลำดับความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบของทั้ง 3 ขนาด เท่ากับ 2.07, 2.08 และ 2.12 ตามลำดับ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีปริมาณของ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 90 ส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก และเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 [7] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.21 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำและเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1

ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/S) เท่ากับ 0.90

มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.61 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.57 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.55 เป็นมวลรวมละเอียด ส่วนมวลรวมหยาบใช้เป็นหินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. (หินเบอร์ ¾ นิ้ว) มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.72 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.44 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.45

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	
	เถ้าแกลบดำ (RHA)	เถ้าถ่านหิน (FA)
silicon dioxide, SiO_2	90.0	35.20
aluminum oxide, Al_2O_3	0.51	19.20
iron oxide, Fe_2O_3	2.02	17.81
calcium oxide, CaO	0.52	16.65
magnesium oxide, MgO	0.22	-
sulfur trioxide, SO_3	1.50	0.63
other oxides	-	2.44
loi.	4.71	1.5

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 9:1 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้ปริมาณของอลูมินาและซิลิกาไม่น้อยกว่าเถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และใช้เถ้าแกลบที่มี

ความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าแกลบไม่บด (O) เถ้าแกลบบดหยาบ (M) และเถ้าแกลบบดละเอียด (F) ซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 48, 34, และ 30 ตามลำดับ ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/S) เท่ากับ 0.90 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และบ่มตัวอย่างในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบจนถึงอายุทดสอบ โดยทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มเป็นเวลา 7, 14, 28, และ 60 วัน การเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงดังภาพที่ 1 และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแข็งตัวที่บ่มในอากาศแสดงดังภาพที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ส่วนผสม	สัดส่วนผสม (กก/ม^3)							
	เถ้าถ่านหิน	เถ้าแกลบดำ			มวลรวม		NS	NaOH (Molar)
		O	M	F	ทราย	หิน		
O12666666M	360	40			585	1055	258	103.5 (12)
O14M	360	40			585	1055	258	103.5 (14)
O16M	360	40			585	1055	258	103.5 (16)
O18M	360	40			585	1055	258	103.5 (18)
M12M	360		40		585	1060	258	103.5 (12)
M14M	360		40		585	1060	258	103.5 (14)
M16M	360		40		585	1060	258	103.5 (16)
M18M	360		40		585	1060	258	103.5 (18)
F12M	360			40	585	1065	258	103.5 (12)
F14M	360			40	585	1065	258	103.5 (14)
F16M	360			40	585	1065	258	103.5 (16)
F18M	360			40	585	1065	258	103.5 (18)

หมายเหตุ NS = สารละลายโซเดียมซิลิเกต

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

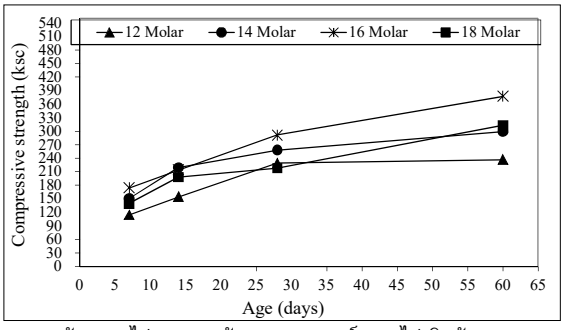
3.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ค่า และทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในอากาศเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน ได้แสดงกำลังอัดที่อายุบ่มต่างๆ ในตารางที่ 3

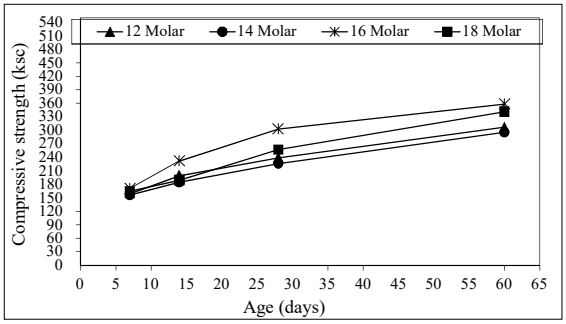
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุที่บ่มในอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่ใช้เถ้าแกลบไม่บด (O) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 48), เถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) และเถ้าแกลบบดละเอียด (F) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30) พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่สูงในช่วง 14 วันแรก และลดลงเล็กน้อยในช่วงอายุบ่ม 14 ถึง 28 วัน (สังเกตจากความชันของกราฟ) ส่วนที่อายุบ่มในช่วง 28 ถึง 60 วัน พบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีอัตราการเพิ่มตามระยะเวลาบ่มที่ลดลง กำลังอัดที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น [5, 6] ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงต้นของอายุทดสอบค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินสูงในช่วง 14 วันแรก ส่วนในช่วง 28 ถึง 60 วัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันมีแนวโน้มลดลงโดยสอดคล้องกับอัตราการเพิ่มของกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ที่มีแนวโน้มลดลงในช่วงระยะเวลาดังกล่าวด้วย โดยผลดังกล่าวมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความละเอียดของเถ้าแกลบดำดังภาพที่ 3(ก) ถึง 3(ค)

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

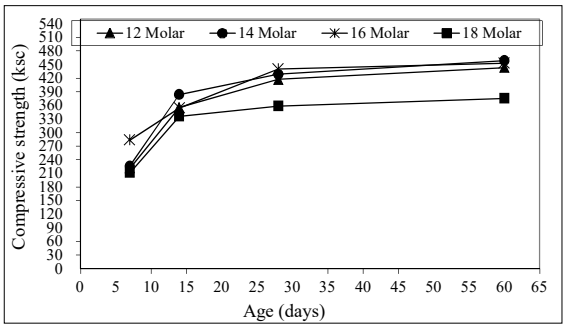
รูปที่ 2 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตแข็งตัวที่บ่มในอากาศ



ก) เถ้าแกลบไม่บด (O) ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 48



ข) เถ้าแกลบบดหยาบ (M) ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34



ค) เถ้าแกลบบดละเอียด (F) ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุที่บ่มในอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน

การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงกว่าส่งผลให้อัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 14 วันแรกสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำกว่า โดยสังเกตจากความชันของกราฟในช่วง 14 วันแรกของกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียด (F) ตามภาพที่ 3(ค) มากกว่ากลุ่มอื่นค่อนข้างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันเกิดขึ้นในช่วง 14 วันแรกสูง โดยสารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบที่มีความละเอียดได้มากกว่าเถ้าแกลบอนุภาคหยาบ และเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในช่วง 14 วันแรกมีอัตราการเพิ่มค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน พบว่า การใช้เถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง (O) และเถ้าแกลบบดหยาบ (M) ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน สูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง (O) และใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน เท่ากับ 207, 198, 216 และ 224 ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน ลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ช่วยชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบที่อนุภาคหยาบได้ดีขึ้น และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาวได้ ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงพบว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน ค่อนข้างสูงอยู่แล้ว จึงทำให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน มีค่าลดลง

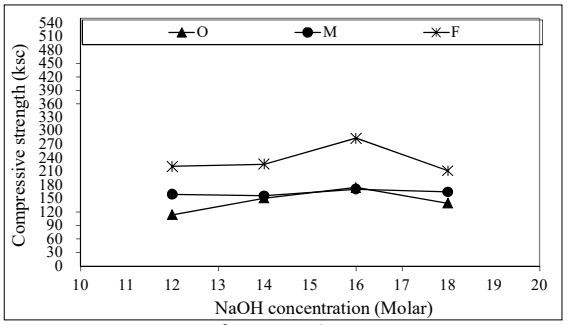
ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม^2)				ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 60 วันเทียบกับอายุ 7 วัน
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	
O12M	115	155	229	237	207
O14M	151	220	258	299	198
O16M	174	214	292	377	216
O18M	140	199	219	313	224
M12M	160	200	239	306	192
M14M	157	184	227	296	189
M16M	171	233	303	359	209
M18M	165	190	258	342	207
F12M	222	356	417	444	200
F14M	226	385	429	459	203
F16M	284	355	440	453	160
F18M	212	336	359	376	177

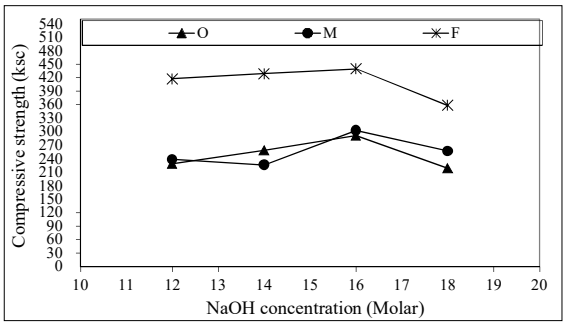
3.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุบ่มในอากาศ 7, 28 และ 60 วัน ดังภาพที่ 4(ก), 4(ข) และ 4(ค) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรงและใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 229, 258, 292 และ 219 กก/ซม^2 ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกส่วนผสมและทุกอายุทดสอบ ดังภาพที่ 4(ก), 4(ข) และ 4(ค) การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น อาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันได้ดีขึ้น และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ [6, 8] นอกจากนั้น การศึกษาที่ผ่านมา [9] พบว่า การชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงมากกว่า 15 โมลาร์ ซึ่งอาจมีผลทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสม

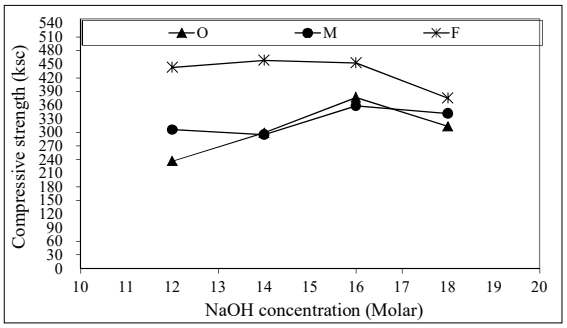
เถ้าแกลบมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์



ก) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 7 วัน



ข) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 28 วัน

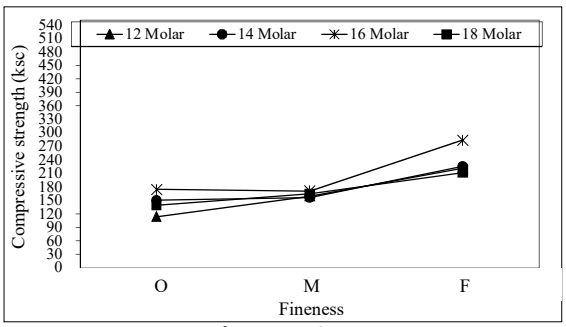


ค) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 60 วัน

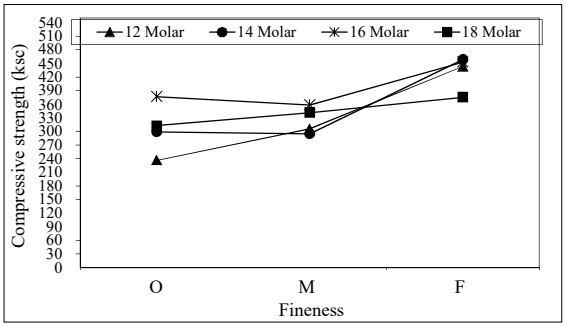
รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลัง อัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน

3.3 ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 7 และ 60 วัน ดังภาพที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ พบว่า การใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดมากขึ้นให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งอายุต้น (7 วัน) และอายุปลาย (60 วัน) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นชัดเจนว่า สารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นได้มากกว่าเถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำกว่า [10] โดยเป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้เถ้าแกลบที่เพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) ไปเป็นเถ้าแกลบบดละเอียด (F) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30) ให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นชัดเจนมากกว่าเถ้าแกลบที่เพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง (O) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 48) ไปเป็นเถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) นอกจากนั้นพบว่า การใช้เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำ มากกว่าความเข้มข้นสูง โดยผลดังกล่าวมีความชัดเจนมากขึ้นที่อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูง มีลักษณะทางกายที่ดีและส่งผลให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันเกิดขึ้นได้ดีอยู่แล้ว ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบที่มีอนุภาคหยาบกว่าจำเป็นต้องใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงจึงจะสามารถชะเอาซิลิกาได้ดี ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น จึงมีบทบาทสำคัญกับเถ้าแกลบที่มีอนุภาคหยาบมากกว่าเถ้าแกลบละเอียด การศึกษาในครั้งนี้มีการใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น ซึ่งกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตส่วนหนึ่งมาจากซิลิกาและอลูมินาที่ชะออกมาจากเถ้าถ่านหิน ส่วนกำลังอัดที่เป็นผลจากเถ้าแกลบสังเกตได้จากการเพิ่มความละเอียดมากขึ้นกำลังอัดสูงขึ้น เช่น การเพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบที่ไม่บด(O) เป็นเถ้าแกลบที่บดละเอียด (F) ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 12 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดที่อายุ 60 วัน เพิ่มขึ้น ถึง 207 กก/ซม^2 (เพิ่มจาก 237 กก/ซม^2 ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต O12M เป็น 444 กก/ซม^2 ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต F12M) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ซิลิกาในเถ้าแกลบมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้จะใช้ปริมาณต่ำกว่าเถ้าถ่านหินค่อนข้างมากก็ตาม



ก) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 7 วัน



ข) อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 60 วัน

รูปที่ 5 ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบดำต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน

4. บทสรุป

1) การใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินมีค่ามากขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนเมื่อเพิ่มความละเอียดจากเถ้าแกลบบดหยาบ (M) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34) ไปเป็นเถ้าแกลบบดละเอียด (F) (ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30)
2) การใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง โดยผลดังกล่าวมีความชัดเจนมากขึ้นที่อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนานขึ้น
3) การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 105/2560

เอกสารอ้างอิง

[1] Cheewaket, T., Jaturapitakkuland, C. and Chalee, W. (2014). Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site. *Materials and Structures*, 47, pp. 1501-1511.

[2] Somna, R., Jaturapitakkul, C., Chalee, W. and Rattanachu, P. (2012). Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate. *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, pp. 16-22.

[3] Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design*, 31, pp. 1242-1249.

[4] Chindaprasirt, P. and Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 303-310.

[5] Chindaprasirt, P., Chalee, W. and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Manage*, 29, pp. 539-543.

[6] Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng*, 22, pp. 1073-1078.

[7] ASTM C618 - 15, (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02.

[8] Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V. and Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, pp. 9-14.

[9] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ วิเชียร ชาลี และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ*, 29(4), 437-446.

[10] Shalini, A., Gurunarayanan, G., Arun kumar, R., Jaya Prakash, V. and Akthivel, S. (2016). Performance of rice husk ash in geopolymer concrete. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2, pp. 2349-6010.

ภาคผนวก ข

รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

รหัสโครงการ 258328 สัญญาเลขที่ 105/2560

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย (ศ. /รศ. /ผศ. /ดร. /อ.) ...รศ.ดร.วิเชียร ชาลี...

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2559 **ถึงวันที่** (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2560

ระยะเวลาดำเนินการ จำนวน ..1....ปี...- .เดือน

<u>รายรับ</u>

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...223,000 .....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2559...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...178,400.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2560.....

งวดที่ 3 (10%) จำนวน ...-.....บาท เมื่อ ...-.....

รวม ...401,400.....บาท

<u>รายจ่าย</u>

หมวด	**งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)**	**งบประมาณที่ใช้จริง (บาท)**	**จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน (บาท)**
1. ค่าตอบแทน	40,000	40,000	0
2. ค่าจ้าง	120,000	120,000	0
3. ค่าวัสดุ	60,000	60,000	0
4. ค่าใช้สอย	181,400	181,400	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	44,600	44,600	0
รวม	446,000	446,000	0

(รศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน