รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน

(Utilization of fly ash-based geopolymer in concrete foam)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222646

สัญญาเลขที่ 131/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน

(Utilization of fly ash-based geopolymer in concrete foam)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤศจิกายน 2559

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มีงบประมาณทั้งโครงการ 386,100 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	386,100 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณโฟม และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ NaOH โดยใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ใช้เม็ดโฟมเป็นมวลรวมในส่วนผสมในอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม เท่ากับ 1:1(S) 1:1.5 (M) และ 1:2 (L)โดยปริมาตร หล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในแบบหล่อขนาด 100 × 100 × 100 มม. บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 14 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน 14 โมลาร์ และมีค่าลดลงเมื่อใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ ตลอดจนปริมาณโฟมที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลง การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อโฟมเท่ากับ 1:1 โดยปริมาตร ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมสูงที่สุด

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม, เถ้าถ่านหิน, กำลังอัด, ความเข้มข้นของ NaOH

Abstract

This research aimed to study the effect of foam content and sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength of geopolymer concrete foam. The geopolymer concrete foam were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2Sio_3) and NaOH solution. The concentration of NaOH was varies at 12, 14, 16 and 18 molar. The ratio of 1:1 (S), 1:1.5 (M) and 1:2 (L) by volume of fly ash : foam were used as an aggregate. The concrete foam specimens of $100 \times 100 \times 100$ mm^3 were cast for air-cured compressive strength at 3, 14 and 28 days. The results showed that the compressive strength of geopolymer concrete foam increase with the increase in NaOH concentration as high as 14 molar and were found to decrease when the NaOH concentration was up to 18 molar. An increase in foam contents result in decreased density and compressive strengths of geopolymer concrete foam. This study found that geopolymer concrete foam with NaOH concentration of 14 molar and volume ratio of fly ash : foam of 1:1 provided the highest compressive strength.

Keywords: Geopolymer concrete foam, Fly ash, Compressive strength, NaOH concentration

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 131/2559

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต หรือวัสดุก่อสร้างอื่นๆ 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	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 คอนกรีตโฟม	4
2.2 จีโอโพลิเมอร์	4
2.3 วัสดุปอซโซลาน	8
2.4 เถ้าถ่านหิน	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	**22**
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	22
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	23
3.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ	24

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล **27**

4.1 สมบัติของวัสดุประสาน 27

4.2 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 29

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 32

4.4 ผลของปริมาณโฟมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 35

4.5 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 39

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ **42**

5.1 สรุปผล 42

5.2 ข้อเสนอแนะ 42

เอกสารอ้างอิง **43**

ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output) **46**

ภาคผนวก ข รายงานการเงิน **57**

ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย **59**

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์ 6
3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 25
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน 28
4.2 กำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 30

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ 5

2.2 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต 7

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 22

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 23

3.3 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 26

4.1 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 28

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 32

4.3 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 35

4.4 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในกลุ่มที่บ่มอุณหภูมิ 65 oซ 35

4.5 ผลของปริมาณโฟมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม 38

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมและกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 38

4.7 ผลของอุณหภูมิที่บ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม เท่ากับ 1:1 (S) โดยปริมาตร 41

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตโฟม หรือโฟมกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) ที่ผ่านกรรมวิธีเคลือบผิวภายนอกด้วยสารพิเศษ แทนมวลรวมในการผลิตคอนกรีต ซึ่งจุดเด่นของคอนกรีตโฟมเป็นการผลิตวัสดุก่อสร้างที่ลดการนำความร้อน และลดน้ำหนักของวัสดุก่อสร้างที่ทำให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ลดลง ตลอดจนโฟมมีน้ำหนักเบาจึงทำให้สามารถขนส่งได้ง่าย อย่างไรก็ตามเม็ดโฟมมีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมจากหินและทราย เนื่องจากมีอากาศอยู่ภายในเม็ดโฟมมาก จึงมีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตโฟมต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป กำลังรับแรงของคอนกรีตโฟมขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุประสานที่ใช้ในการผสม โดยวัสดุประสานที่มากขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตโฟมสูงขึ้น และมีความหนาแน่นสูงขึ้น (Posi et al., 2015) ด้วย คอนกรีตโฟมไม่เหมาะสมในการใช้เป็นคอนกรีตโครงสร้างในการรับแรงเชิงกล เนื่องจากมีกำลังอัดที่ต่ำ ความทึบน้ำต่ำ ที่ส่งผลให้มีการกัดกร่อนต่อเหล็กเสริมคอนกรีตได้ง่าย ดังนั้น การใช้งานคอนกรีตโฟมจึงมีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำผนัง เช่น อิฐก่อผนัง หรือ ผนังสำเร็จรูป ส่งผลให้ลดการนำความร้อนของผนังทำให้อาคารเย็นลง และประหยัดพลังงานได้ คอนกรีตโฟมจึงมีจุดเด่นในเรื่องของการผลิตวัสดุก่อสร้างเพื่อใช้ในอาคารที่ต้องการประหยัดพลังงานจากระบบปรับอากาศ

ปัจจุบันคอนกรีตโฟมได้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตโฟม ขึ้นกับปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีด้านวัสดุประสานในงานคอนกรีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการทำวัสดุประสานโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมที่เรียกว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ โดยปัจจุบันพบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้ในอุณหภูมิปกติ โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการช่วยเร่งปฏิกิริยาอีกต่อไป (Davidovits, 1991) การใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้าง เป็นการส่งเสริมการใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ใช้วัสดุตั้งต้น ที่เป็นผลพลอยได้หรือของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า (เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น) จะช่วยลดปัญหาการกำจัดทิ้งของเถ้าต่างๆเหล่านี้ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่ได้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม จึงเป็นการส่งเสริมการลดใช้ปูนซีเมนต์ลง และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อีกทางด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้วัสดุประสานจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน ในการผลิตคอนกรีตโฟม โดยศึกษาผลของปริมาณโฟมและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) เพื่อศึกษาผลของปริมาณของเม็ดโฟม ต่อกำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

1.2.2) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิบ่ม ต่อกำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

1.2.3) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้จะศึกษาการผลิตคอนกรีตโฟมจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน โดยทำการทดสอบกำลังอัด และความหนาแน่นของคอนกรีตโฟมจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ18 โมลาร์ และใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) เป็นมวลรวม โดยการแปรเปลี่ยนปริมาณโฟม 3 อัตราส่วน หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมทรงลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 มม^3 หลังจากนั้น บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศโดยใช้พลาสติกใสพันรอบไว้ ทำการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นที่อายุ 3 14 และ 28 วัน นอกจากนั้น ศึกษาผลของอุณหภูมิของการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม เท่ากับ 1:1 (S) โดยปริมาตร โดยนำไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนบ่มตัวอย่างทดสอบต่อเนื่องในอากาศโดยใช้พลาสติกใสพันรอบไว้จนถึงอายุทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน เพื่อให้ได้คอนกรีตโฟมที่มีกำลังอัดสูง และความหนาแน่นต่ำ ตลอดจนสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตคอนกรีตโฟมโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ให้สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.4.2 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตโฟม

คอนกรีตโฟมจัดอยู่ในประเภทของคอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป คือหน่วยน้ำหนักเมื่อแข็งตัวแล้ว (แห้ง) น้อยกว่า 1,850 กก./ซม^3. ซึ่งโดยทั่วไปคอนกรีตเบามีหน่วยน้ำหนักประมาณ 400 – 1,850 กก./ซม^3. มีกำลังแรงอัดประมาณ 10-450 กก./ซม^{3}และมีค่าการนำความร้อน 0.2-1.0 W/m.K ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่มีน้ำหนักประมาณ 2,100 – 2,500 กก./ลบ.ม. มีกำลังอัดประมาณ 150 – 1000 กก./ซม^3 และค่าการนำความร้อน 16 – 1.9 W/m.K

คอนกรีตโฟม (Foamcrete) คือ ผลิตจากเม็ดโฟมพลาสติก หรือ Expanded Polystyrene Foam (EPS Foam) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม.และ 5 มม. ภายในของเม็ดโฟมพลาสติกจะประกอบไปด้วยอากาศประมาณ 98% และมีพลาสติกอยู่ 2% จึงทำให้เม็ดโฟมพลาสติกนั้นมีน้ำหนักเบา และนอกจากนั้นเม็ดพลาสติกของคอนกรีตโฟม ยังผ่านกระบวนการเคลือบสารพิเศษ เพื่อทำให้เม็ดโฟมผสานกับปูนซีเมนต์ในขณะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับซีเมนต์เมื่อแห้งตัวแล้ว ในงานก่อสร้างที่ใช้คอนกรีตโฟม ได้แก่ โครงสร้างป้องกันไฟในส่วนที่เป็นเหล็กของอาคารสูง พื้นที่ที่ต้องการเพิ่มความหนา หลังคาคอนกรีตที่ต้องการลดความร้อน คอนกรีตบล็อก ผนังกั้นห้อง งานสถาปัตยกรรม หรือแม้แต่ใช้ทำเรือท้องแบนแบบคอนกรีต เป็นต้น

2.2 จีโอโพลิเมอร์

สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์สารปอซโซลานที่นิยมใช้กันได้แก่ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ดังในสมการที่ (2.1) โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง

โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้ (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al*., 2009 ; Chindaprasirt *et al*., 2009)

$$M_n [-(SiO_2)_z - AlO_2-]_n . w H_2O \qquad (2.1)$$

โดยที่ M คือ ธาตุอัลคาไล

– คือ การยึดเกาะพันธะ

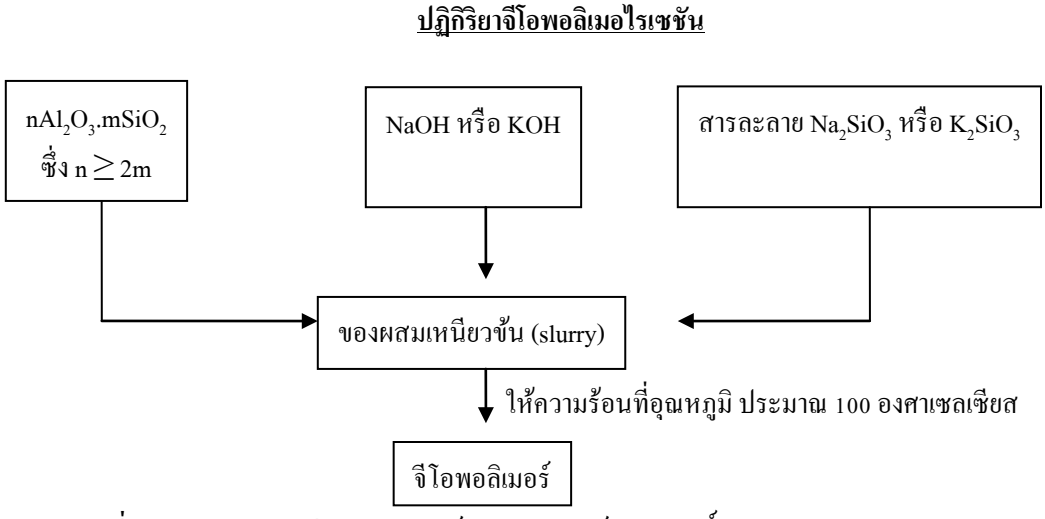
z คือ จำนวนโมเลกุลของ $Si - O_2$ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

2.2.1 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอพอลิเมอร์

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($CaO.2SiO_2.3H_2O$) ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล้อค (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมาก และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต



รูปที่ 2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549)

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	**ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน**
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิเกต
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation)ในสารละลาย	การชะของแข็งที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบออกมาสู่เพสต์
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควบแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาในเพสต์
อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	90 - 300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ
ช่วงความเป็นกรด-เบส	6 – 11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	ของผสมของเฟลเจลแบบอสัณฐานและกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

2.2.2 ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

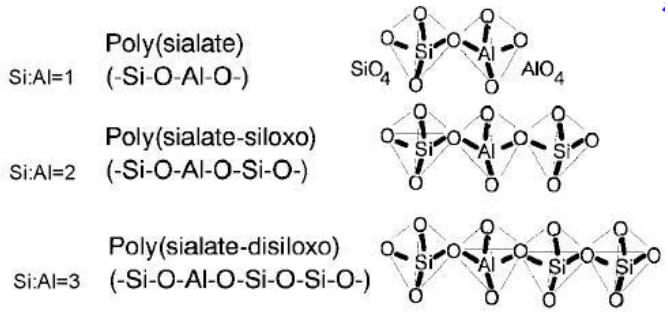
สารจีโอโพลิมอร์เป็นสารจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีรูบพรรณสัณฐานแน่นอนเป็นส่วนประกอบของสารลักษณะอสัณฐาน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเมื่อผสมสารละลายของอัลคาไลสามาถทำปฏิกิริยาที่อุณภูมิปกติหรือสูงกว่า และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดีปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดี่ยวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์สามาถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น (Davidovits, 1991)

2.2.2.1 การชะละลาย (dissolution)

เถ้าถ่านหินเมื่อผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเช่า โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ โดยอลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมามาก เนื่องจากจากเป็นสารหลัก เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้นส่วนหนึ่งของเถ้าถ่านหินจะถูกทำลายที่ผิว ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิวและสารละลายจะสามาถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

2.2.2.2 การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ (polymerization)

ผลผลิตของปฏิกิริยาเบื้องต้นเป็นหน่วยปิรามิดสามเหลียมสี่ด้านของ Si^{4+}และ Al^{3+} ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบ 4 แขมกับออกซิเจน หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ซึ่งจะมีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึนหน่วยดังกล่าวจะเปลียนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี้ด้าน สอง สาม และสี่หน่วยได้แก่โพลิไซอะเลต (polysialate, PS) โพลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate disiloxo , PSDS) ตามลำดับดังแสดงใน รูปที่ 2.2 ปริมาณของSiO_4 เพิ่งขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วยเมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชือมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกันก็จะเกิดมากขึ้นและหนาแน่นขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามาถรับแรงได้



รูปที่ 2.2โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต (Davidovits, 1991)

2.3 วัสดุปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Matakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีการใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ซึ่งในประเทศไทยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีคุณภาพที่ดี เนื่องจากมีอนุภาคที่กลมตันมีความละเอียดโดยไม่ต้องผ่านการบดก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งจะทำให้เกิดความประหยัดในงานก่อสร้าง

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาได้มีการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ได้ โดยวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้งานมากในปัจจุบันได้แก่ เถ้าถ่านหิน และซิลิก้าฟูม อย่างไรก็ตามวัสดุประสานดังกล่าวยังจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมอยู่

ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นดังสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCa.y\,SiO_2.z\,H_2O \qquad (2.2)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_2 + H_2O \longrightarrow xCa.y\ AlO_3.z\ H_2O \qquad (2.3)$$

ค่า x, y และ z จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสมการที่ 2.2 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของซิลิกาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และสมการที่ 2.3 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของอลูมินาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ให้กำลังกับคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์เพราะมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

2.4 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า และเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตาเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอน หรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.4.1 ถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่

1. แอนทราไซต์ (Anthracite)
2. บิทูมินัส (Bituminous)
3. ซับบิทูมินัส (Sub – Bituminous)
4. ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

2.4.2 การเผาถ่านหิน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

1. การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน เถ้าถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผานี้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย เถ้าถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใส ๆ (Vitreous particle)

2. การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้า-ลอย ที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผานี้ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

3. การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ

ในกระบวนการเผาเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆดังที่กล่าวมาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผาดังต่อไปนี้

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอรตซ์ (Quartz) เคาลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และแคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) มาเคไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไตต์ (Fe_2O_3) และแมกเนไตต์ ($FeO.Fe_2O_3$) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของเถ้าถ่านหินดังสมการ

$$2FeS_2 \xrightarrow{250-850\ ^{\circ}C} 2FeS + S_2 \qquad (2.4)$$

$$5FeS + S_2 + 10.50O_2 \xrightarrow{>850^{\circ}C} Fe2O_3 + FeO.Fe_2O_3 + 7SO_2 \qquad (2.5)$$

$$Fe_2O_3 \text{ และ } FeO.Fe_2O_3 \xrightarrow{1000-1650\ ^{\circ}C} \text{เหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้วบางส่วน} \qquad (2.6)$$

2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$) ดังสมการ

$$CaCO_3 \xrightarrow{>850^{\circ}C} CaC + CO_2 \qquad (2.7)$$

$$CaO + SO_2 + 0.5O_2 \xrightarrow{>850^{\circ}C} CaSO_4 \qquad (2.8)$$

3. ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มูลไลต์ (mullite, $3Al_2O_3.SiO_2$) และ ควอตซ์ (SiO_2) ในรูปของผลึกของคริสโตบาไลต์ (cristobalite) ดังสมการ

$$\text{ดินเหนียวบางส่วน} \xrightarrow{850-1000^{\circ}C} \text{แก้ว} \qquad (2.9)$$

$$\text{ดินเหนียวบางส่วน} \xrightarrow{1000-1100^{\circ}C} \text{แก้ว} + 3Al_2O_3.SiO_2 + SiO_2 \qquad (2.10)$$

$$\text{ดินเหนียวบางส่วน} \xrightarrow{>1100\ ^{\circ}C} \text{แก้ว} + 3Al_2O_3.2SiO_2 + SiO_2 + Na_2O \text{ (ก๊าซ)} + K_2O \text{ (ก๊าซ)} \qquad (2.11)$$

4. ควอรตซ์ (SiO_2) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้วดังสมการ

$$SiO_2 \text{ บางส่วน} \xrightarrow{>1200^{\circ}C} \text{แก้ว} \qquad (2.12)$$

จะเห็นได้ว่าเถ้าถ่านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่าน

หินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาระบบนี้ถ้าถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้เถ้าถ่านหินมีปริมาณ CaO และ $CaSO_4$ สูงได้

ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้เถ้าถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นเถ้าถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไตต์ แมกเนไตต์ มูลไลต์ และควอรตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นคงมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย เถ้าถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในเถ้าถ่านหิน ทำให้เถ้าถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere) (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.4.3 ชนิดของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอริคออกไซด์ (Ferricoxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากแร่ดินเหนียวและควอรตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำทำให้เถ้าถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

เถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้าถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เถ้าถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10

2.4.4 รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เมื่อเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) เถ้าถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็ก ๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

เถ้าถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้าถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินกลวงคือแก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากเถ้าถ่านหินกลวงเป็นเถ้าถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้าถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง (Acoustic)

เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเถ้าถ่านหินก้นเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.4.5 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยมคำนวณโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่

จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.^{2}/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.^{2}/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.^{2}/ก.

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนเถ้าถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30

2.4.6 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถ้าถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้าถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีเถ้าถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้าถ่านหินละเอียด

2.4.7 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO, Na_2O, K_2O, SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on lgnition, LOI)

2.4.8 การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต

การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ที่นำไปแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ทำให้ลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตลอดจนเถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีสามารถใช้ปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตได้ดีขึ้น

ความคงทนของคอนกรีตหมายถึง ความสามารถของคอนกรีตที่ทนทานต่อสภาพการทำลายทางกายภาพ และทางเคมี และมีกำลังอัดเชิงกลที่สามารถใช้งานได้ยาวนาน ความคงทนของคอนกรีตเป็นสมบัติที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง เช่น ดินเค็ม สิ่งแวดล้อมทะเล โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ความคงทนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความสามารถในการต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต การทำลายโดยกรด การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และการต้านทานคาร์บอเนชั่น ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเช่นกัน

1) การทำลายโดยสารซัลเฟต การใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะนอกจากจะมีคุณสมบัติของปอซโซลานแล้วยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้เป็นอย่างดี ACI 232.2R กล่าวว่า เถ้าถ่านหินสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตจากซัลเฟตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าถ่านหิน Class F ซึ่งต้านทานได้ดีมากกว่าการใช้เถ้าถ่านหิน Class C การต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดหรือซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการที่ปฏิกิริยาปอซโซลานได้เปลี่ยนรูปของ $Ca(OH)_2$ ให้เป็น CSH ซึ่งเป็นสารประกอบที่นอกจากจะเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตแล้วยังทนต่อสภาพการกัดกร่อนได้สูงกว่า $Ca(OH)_2$ อย่างมาก สารประกอบซัลเฟตสามารถทำลายโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำให้ยิปซัม แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต (Calcium Sulfoauminate) หรือเอททริงไกต์ (Ettrigite) และซิลิกาเจล (Silica Gel) ที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตขยายตัวและเกิดการแตกร้าวได้ การใช้เถ้าถ่านหินทำให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์เนื่องจากซัลเฟตลดลง การลดการทำลายของซัลเฟตยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ลดปริมาณน้ำและเข้าไปแทรกทำให้เพสต์แน่นขึ้นจึงทำให้สารซัลเฟตซึมเข้าสู่เนื้อภายในได้ยากขึ้น

2) การทำละลายโดยกรด คอนกรีตและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ไม่ดีนัก เพราะมีความเป็นด่างสูงและถูกทำลายกรดได้ง่าย การกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ และส่วนใหญ่จะทำให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมที่ละลายน้ำหรือเกลือของกรดนั้นๆ ได้ น้ำหนักและกำลังรับแรงของมอร์ต้าร์และคอนกรีตจะลดลงจากการทำลายของกรดซัลฟูริก การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถ

ลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะเพิ่มความต้านทานของการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 10 ได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน การใช้เถ้าถ่านหินหยาบในส่วนผสมมอร์ต้าร์สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินละเอียดในสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกร้อยละ 5 เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินหยาบทำให้ปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เพราะการใช้เถ้าถ่านหินหยาบมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้าถ่านหินละเอียดและปูนซีเมนต์ และจากการที่เถ้าถ่านหินหยาบสามารถยึดเกาะกับเพสต์ได้ดี

3) การซึมผ่านของคลอไรด์ การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ส่วนผสมมีความเป็นด่างสูง และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยจะเกิดฟิล์มบางๆ ของ γ –Fe_2O_3 เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้อิออนของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ คลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตและเมื่อมีปริมาณสูงกว่าระดับวิกฤต (Chloride Threshold Value) จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม การใช้เถ้าถ่านหินสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ และการใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้น

4) การเกิดคาร์บอเนชั่น (Carbonation) เป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก pH 13 เหลือเพียง 8-9 และทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลายได้เช่นกัน การเพิ่มเถ้าถ่านหินจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นมากขึ้น และการบ่มคอนกรีต 7 และ 28 วัน สามารถลดการเกิดคาร์บอเนชั่นได้ เกือบครึ่งเมื่อเทียบกับการบ่มเพียงวันเดียว การเลือกส่วนผสมที่มีเนื้อแน่น (Dense) จะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย นอกจากนี้การเกิดคาร์บอเนชั่นเฉพาะคอนกรีตที่แห้งพอประมาณและไม่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีตที่เปียกชื้นตลอดเวลา สำหรับโครงสร้างประเภทนี้จึงไม่ต้องคำนึงถึงการเกิดคาร์บอเนชั่น อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าถ่านหินแม้ว่าจะลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นเร็วขึ้น แต่การใช้เถ้าถ่านหินทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดคาร์บอเนชั่นลดลง ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินจึงมีทั้งผลดีและผลเสียต่อการเกิดคาร์บอเนชั่นคอนกรีต

โดยสรุปแล้ว เถ้าถ่านหินนิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรก พบว่าเถ้าถ่านหินมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สองเนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าถ่านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ

ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้าถ่านหินจะช่วยทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้นทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวก ง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าถ่านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง

การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีข้อดี ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ที่สำคัญคือ เพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าถ่านหินจะมีข้อเสียด้วย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้น เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันคอนกรีตโฟมเป็นวัสดุก่อสร้าง ที่ทำจากเพสต์ของปูนซีเมนต์ผสมเม็ดโฟม งานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาคอนกรีตโฟมมีค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะการศึกษาที่เกี่ยวกับการใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน งานวิจัยส่วนใหญ่ได้มุ่งเน้นไปที่คอนกรีตมวลเบาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหลัก อาจในรูปคอนกรีตบล้อคมวลเบาหรืออิฐมวลเบา ที่เพิ่มโฟมหรือฟองอากาศในส่วนผสมมอร์ต้าร์หรือใช้มวลรวมหยาบที่เบากว่าหิน นักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบา มีส่วนผสมต่างๆ ที่เหมาะสมในการใช้ในการก่อสร้าง อยู่หลายแบบ ดังนี้

ไชยยันต์ และ คณะ (2546) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาโดยการใช้ตะกรันจากอุตสาหกรรมรีไซเคิลเหล็กเป็นมวลรวมหยาบเพื่อทดแทนการใช้หิน โดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ในการทดลองวัสดุประสานจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 60:40 และ 40:60 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 นอกจากนี้ยังกำหนดให้วัสดุประสานมีปริมาตรร้อยละ 40, 55 และ 70 ของช่องว่างมวลรวม การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาเป็นไปตาม มอก. 58-2530 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุประสานที่มีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าถ่านหิน 40:60 แทนที่ช่องว่างระหว่างมวลรวมในอัตราร้อยละ 70 สามารถให้ค่ากำลังอัดได้เท่ากับ 44.80 และ 68.73 กก/ซม.^{2} ที่อายุ 3 และ 28 วัน ตามลำดับ และมีค่าโมดูลัสการแตกหักเท่ากับ 10.71 กก/ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้ยังมีค่า

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำเพียง 0.089 วัตต์/เมตร/องศาเซลเซียส โดยมีความหนาแน่นเท่ากับ 1380 กก/ม.^{3}

เรืองรุชดิ์ และ ฉัตรชัย (2550) ได้ศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาเป็นมวลรวมและใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบา โดยใช้เถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตบล็อกมวลเบาที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและเถ้าก้นเตาเป็นมวลรวม สามารถนำมาผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาได้

สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ และคณะ (2546) ได้ทำการวิจัยการศึกษาคอนกรีตบล้อคที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาแกลบและเปลือกไม้จากโรงไฟฟ้า มาใช้ในการศึกษา โดยนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มาจากโรงงานโดยตรง และได้รับการบดให้วัสดุค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 25 ถึง 30 มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20 และ 30 เพื่ออัดอิฐคอนกรีต คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และทดสอบกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน พบว่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ขึ้นอยู่กับการแทนที่ปูนซีเมนต์และความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ กล่าวคือ เมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มากขึ้น กำลังอัดยิ่งต่ำและความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สูงขึ้นยิ่งทำให้กำลังอัดของอิฐคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาเถ้าแกลบ- เปลือกไม้โดยการบดอนุภาคให้มีความละเอียดขึ้น สามารถทำให้มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และนำมาใช้ผลิตอิฐคอนกรีตได้ดี

ยุวดี หิรัญ (2551) ได้ทำการศึกษาการอัดบล็อกปูถนนคอนกรีตพรุน เพื่อศึกษาส่วนผสมของคอนกรีตพรุนที่สามารถอัดขึ้นรูปเป็นบล็อกปูถนนได้ โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ด้านกำลังรับแรงอัด ความซึมน้ำ และความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อกของบล็อกปูถนน ส่วนผสมของคอนกรีตพรุนใช้หินกรวดที่ร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM และเลือกใช้หินกรวดที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") , เบอร์4 และ เบอร์ 8 มาผสมกัน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18, 20 และ 22 โดยน้ำหนักหิน และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.35 และ 0.40 จากการวิจัยพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ใช้สัดส่วนคละของหินกรวดที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") และเบอร์ 8 อย่างละเท่าๆกันโดยน้ำหนักหิน และส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ ใช้สัดส่วนคละของหินกรวดที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8"), เบอร์ 4 และเบอร์ 8 อย่างละเท่าๆกันโดยน้ำหนักหิน และใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 หรือร้อยละ 22 โดยน้ำหนักหิน จะมีความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อกปูถนนได้ดี และส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) 0.40 ซีเมนต์เพสต์จะเคลือบผิวมวลรวมได้ดี

ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ คณะ (2552) ได้ศึกษาการทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเถ้าก้นเตา โดยใช้เถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาเถ้าถ่านหินแบบฟลูอิดไดซ์เบด มาใช้เป็นมวลรวมหยาบใน

ส่วนผสมคอนกรีตบล็อค และทำการอัดคอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวา-แรม (Cinva-ram) หลังจากนั้นบ่มคอนกรีตบล็อคในอากาศและทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ตลอดจนทดสอบความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำในคอนกรีตบล็อกที่อายุทดสอบ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของเถ้าก้นเตาที่มากขึ้น และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีตบล็อกมากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกทุกส่วนผสม ที่ได้จากการศึกษามีค่าสูงกว่ามาตรฐานของคอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนัก (มอก. 57-2533) ที่กำหนดให้ไม่ต่ำกว่า 110 กก/ซม^2 และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำน้อยกว่าค่ามาตรฐาน โดยกำหนดไว้ไม่ให้เกินร้อยละ 30 ซึ่งถือว่าคอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดที่ดีเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยจัดเป็นคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภท ก ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ได้มีการนำเอาวัสดุต่างๆ มาเป็นส่วนผสมเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำคอนกรีตมวลเบาและคอนกรีตบล้อค ซึ่งวัสดุประสานหลักที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล้อคหรือคอนกรีตมวลเบายังคงเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงพยายามศึกษาการทำคอนกรีตมวลเบาที่อยู่ในรูปของคอนกรีตโฟมโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่จะใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานแทน การศึกษาที่เกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในประเทศไทยยังมีน้อย และยังไม่พบการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ การศึกษาที่เกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สำคัญมีดังนี้

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2548) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ หรือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่เตรียมจากเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง ในช่วงอัตราส่วนผสมโดยโมลดังนี้ Na_2O/SiO_2 = 0.2 - 0.48, SiO_2/Al_2O_3 = 3.3 - 4.5 , H_2O/Na_2O = 10 - 25 และ Na_2O/Al_2O_3 = 0.8 - 1.2 โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิ 65 ^{o}ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง Optical Microscope (OM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่เป็นอัตราส่วนผสมต่างกัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัสดุ โดยจะเห็นเม็ดเจลเกิดการก่อตัวรอบๆ เถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีการเปลี่ยนแปลงเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ขึ้น ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์จะให้กำลังอัดสูงสุด 56 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ (2552) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และอุณหภูมิบ่มที่เหมาสมของคอนกรีตที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำเป็นส่วนผสม โดยหล่อเป็นตัวอย่างขนาด 10 x 10 x 10 ซม.^{3} ซึ่งกำหนด

อัตราส่วนทางเคมีต่างกัน 7 ส่วนผสม แบ่งอุณหภูมิบ่มเป็น 2 ชุด บ่มอุณหภูมิห้อง และบ่มอุณหภูมิ 60 ^{o} ซ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน จากการศึกษาพบว่า พฤติกรรมการรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 161 กก./ซม.^{2} และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 329 กก./ซม^{2} จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้าถ่านหินลงก็จะได้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น เช่นเดียวกัน

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 (Na2SiO3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลุ่มแรกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่ กลุ่มที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, และ 2.8 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในอากาศ และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสีย

กำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

กนกเนตรและคณะ (2557) ได้ศึกษาผลของขนาดมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัด และการซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กำหนดอัตราส่วนระหว่าง Si/Al คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 3 ขนาด คือ 3/8''(S), 1/2'' (M) และ 3/4'' (L) หล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มม.^{3} เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในอากาศ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้นและลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NaOH ลดลง นอกจากนั้นพบว่า การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กลงส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นและการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และ สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ในอุณหภูมิห้อง ซึ่งมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตโฟมได้

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

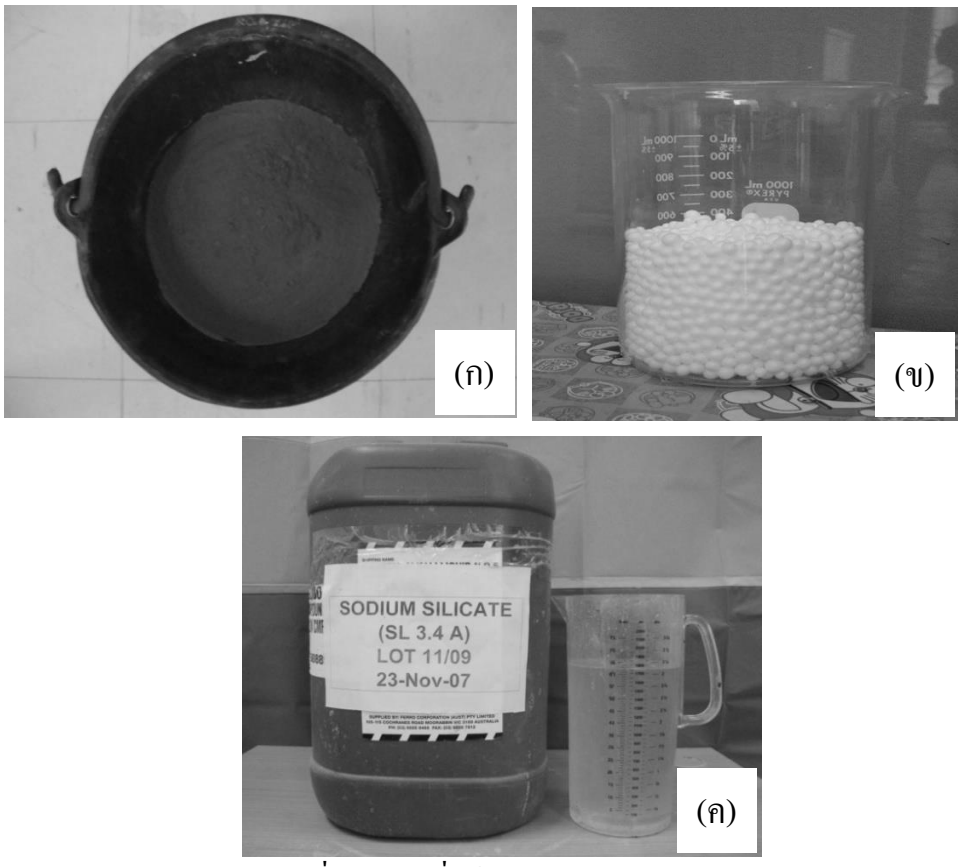
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. เถ้าถ่านหิน : จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีขนาดค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 (รูปที่ 3.1(ก))

2. เม็ดโฟม : ใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) ที่มีลักษณะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มม. และมีความหนาแน่น 15.5 กก/ม^3 เป็นมวลรวมหยาบ (รูปที่ 3.1(ข))

3. $Na_2O:SiO_2$: สารละลายโซเดียมซิลิเกต ตามมาตรฐาน มอก. 433 - 2539 ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30^{o}ซ (รูปที่ 3.1(ค))

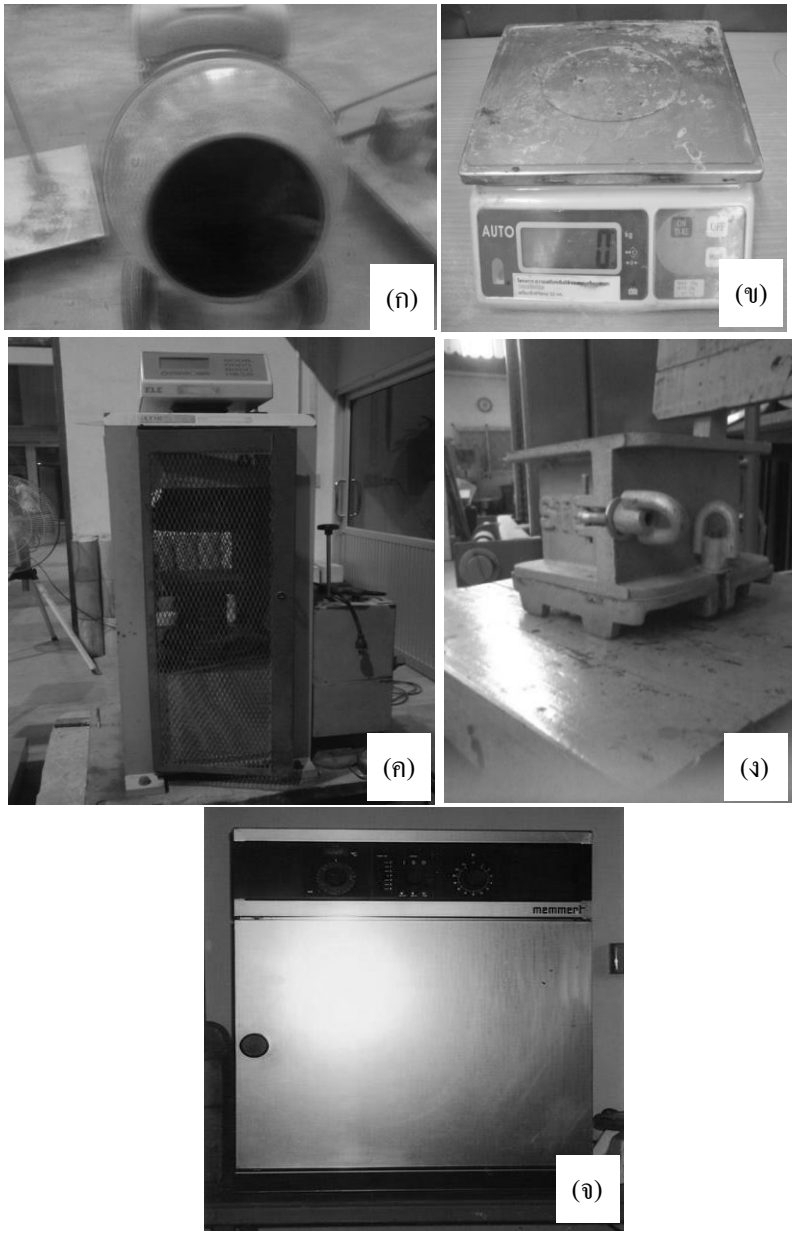
4. NaOH : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด ตามมาตรฐาน มอก. 150 - 2518



รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องผสมคอนกรีตโฟม (รูปที่ 3.1(ก))
2. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (รูปที่ 3.1(ข))
3. เครื่องทดสอบกำลังอัด ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE (รูปที่ 3.1(ค))
4. แบบหล่อคอนกรีต ขนาด 100 × 100 × 100 มม^3 (รูปที่ 3.1(ง))
5. ตู้อบ (รูปที่ 3.1(จ))
6. อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ถุงมือ เกรียง บิกเกอร์ กระบอกตวง พลาสติกใส



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.3.1 การเตรียมสารละลาย

3.3.1.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 480.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

3.3.1.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 14 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 560.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์

3.3.1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 16 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 640.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 16 โมลาร์

3.3.1.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 720.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮ-ดรอกไซด์เข้มข้น 18 โมลาร์

3.3.2 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

เตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) ซึ่งมีความหนาแน่น 15.5 กก/ม^3 เป็นมวลรวมหยาบ และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม 3 ค่า คือ 1:1 (S) 1:1.5 (M) และ 1:2 (L) โดยปริมาตร โดยปรับเป็นส่วนผสมโดยน้ำหนักได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม					
	เถ้าถ่านหิน (กก.)	เม็ดโฟม (กก.)			NaOH (กก.)	$Na_2O:SiO_3$ (กก.)
		S (1:1)	M (1:1.5)	L (1:2)		
12 M-S	772	5.5	-	-	67	167
12 M-M	772	-	8.1	-	67	167
12 M-L	772	-	-	11.0	67	167
14 M-S	772	5.5	-	-	67	167
14 M-M	772	-	8.1	-	67	167
14 M-L	772	-	-	11.0	67	167
16 M-S	772	5.5	-	-	67	167
16 M-M	772	-	8.1	-	67	167
16 M-L	772	-	-	11.0	67	167
18 M-S	772	5.5	-	-	67	167
18 M-M	772	-	8.1	-	67	167
18 M-L	772	-	-	11.0	67	167

3.3.3 การหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน

ทำการหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมทรงลูกบาศก์ขนาด 100 × 100 × 100 มม^3 สำหรับทดสอบกำลังอัด ตามส่วนผสมคอนกรีตโฟมในตารางที่ 3.1 หลังจากนั้น บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศโดยใช้พลาสติกใสพันรอบไว้ โดยทดสอบกำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมแสดงดังภาพที่ 3.3

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

3.3.4 การทดสอบสมบัติจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

ทำการทดสอบกำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมทรงลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 มม^3 และบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศโดยใช้พลาสติกใสพันรอบไว้ โดยแบ่งส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 14 โมลาร์ ไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนบ่มตัวอย่างทดสอบต่อเนื่องในอากาศโดยใช้พลาสติกใสพันรอบไว้จนถึงอายุทดสอบ โดยทำการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน

บทที่ 4

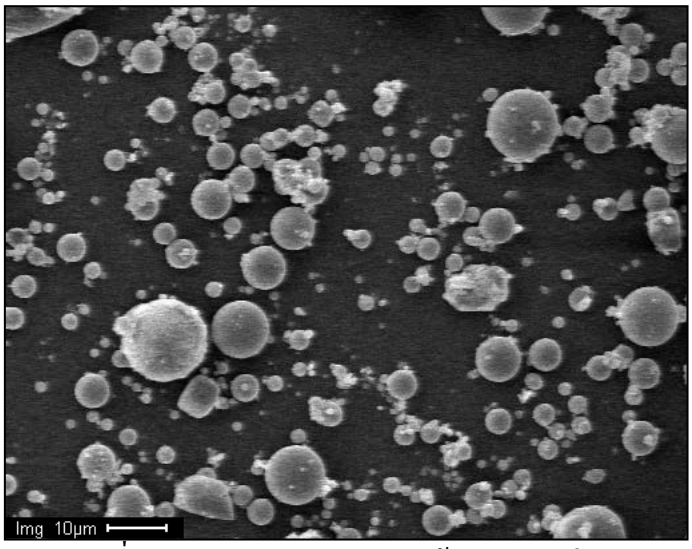
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 สมบัติของวัสดุประสาน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน

4.1.1.1 รูปร่าง

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าถ่านหินจากภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM ในกำลังขยายต่างๆกันตามความเหมาะสมของขนาดอนุภาค ตามรูปที่ 4.1 เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีลักษณะทรงกลมตัน ผิวเรียบ มีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นการเผาถ่านหินด้วยเตาแบบ PCC (Pulverized Coal Combustion) ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส ในการเผาไหม้ ทำให้เถ้าถ่านหินเกิดการหลอมเหลวจนเป็นทรงกลมตัน



รูปที่ 4.1 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

4.1.1.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียด

วัสดุประสานได้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้

ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน โดยความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาโดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงการพัฒนากำลังอัดในคอนกรีตจะเร็วขึ้นเพราะความละเอียดสูงก็หมายถึง มีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรท์เซชั่น ในจีโอพอลิเมอร์

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน ที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 70.91 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

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

4.1.3 สมบัติของมวลรวมและสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

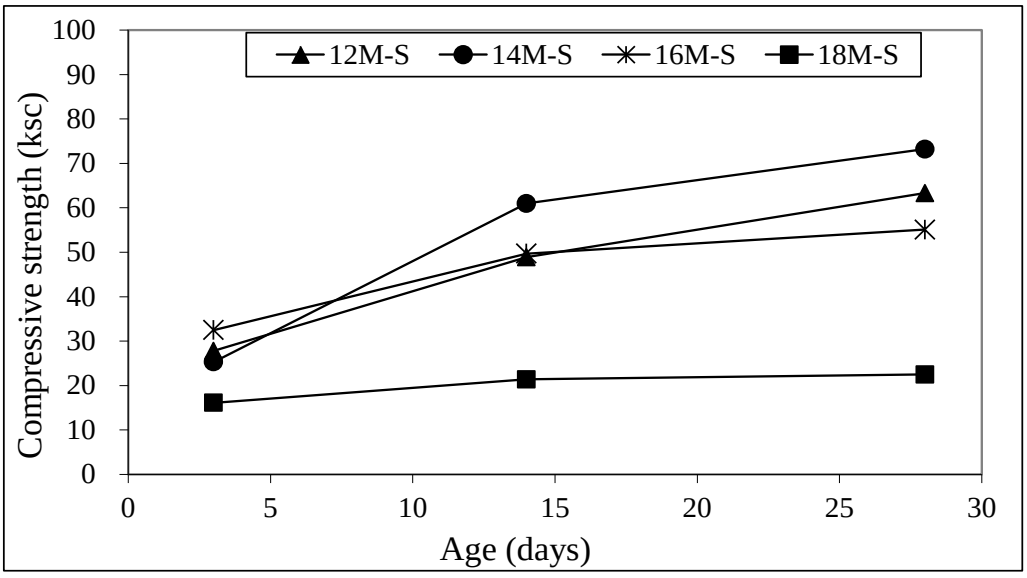
สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°ซ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) ที่มีลักษณะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มม. และมีความหนาแน่น 15.5 กก/$ม^3$ เป็นมวลรวมหยาบ

4.2 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

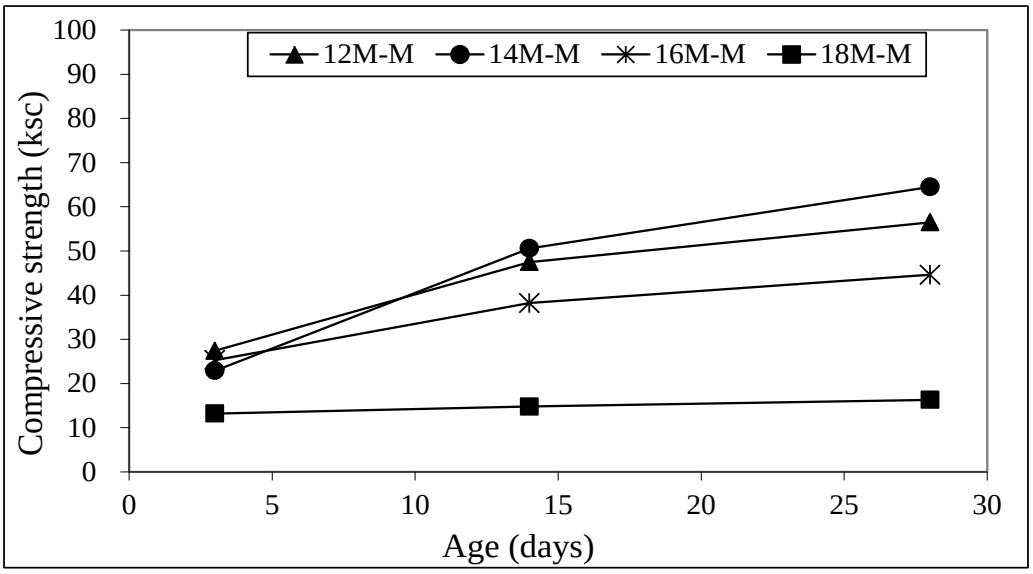
พิจารณากำลังอัดของจีโอพอลิมอร์คอนกรีตโฟมดังตารางที่ 3 และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมหลังบ่มในอากาศ เป็นเวลา 3, 14 และ 28 วัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ดังรูปที่ 4.2 พบว่า ทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา โดยอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 14 วัน จะสูงกว่า ช่วง 14 ถึง 28 วัน ทั้งนี้อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่น ที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานเกิดขึ้นในช่วงต้น และมีผลในการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้น (Davidovits, 1991; Chindaprasirt et al., 2009; Gum Sung Ryu et al., 2013) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม พบว่า ที่ความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ มีผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกกลุ่มการแทนที่มวลรวมดังรูปที่ 4.2(ก) ถึง 4.2(ค) โดยสังเกตได้จากร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 3 วัน (ตารางที่ 4.2) ที่ต่ำกว่ากลุ่มอื่น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อโฟม เท่ากับ 1:1 (S) โดยปริมาตร และใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 12, 14 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 3 วัน เท่ากับ 227, 289, 169 และ 139 ตามลำดับ การที่การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้สารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ อาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจทำให้สมบัติในการยึดประสานลดลงได้ (Chindaprasirt and Chalee, 2014)โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่ทุกอายุการทดสอบต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นอื่นค่อนข้างชัดเจน

ตารางที่ 4.2 กำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

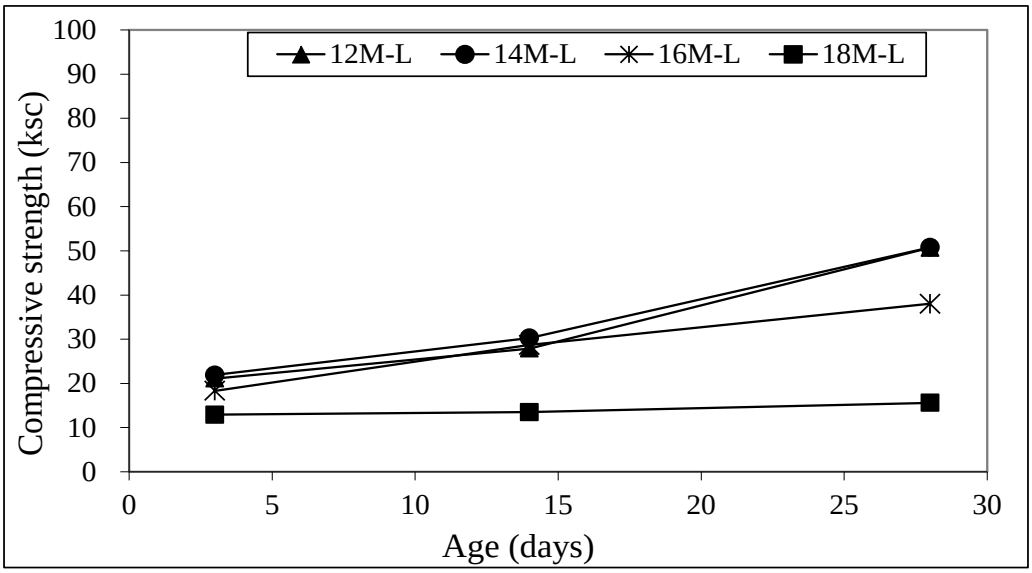
ความเข้มข้นของ NaOH	ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก./ม^3)	กำลังอัด (กก/ซม^2)			กำลังอัดที่28 วัน เทียบกับ 3 วัน (ร้อยละ)	กำลังอัดที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 65 °ซ (กก./ซม^2)		
			3 วัน	14 วัน	28 วัน		3 วัน	14 วัน	28 วัน
12 M	12 M-S	1560.00	27.8	48.9	63.3	227.70	41.8	55.9	87.2
	12 M-M	1511.20	27.4	47.5	56.5	206.20	-	-	-
	12 M-L	1470.40	21.1	27.9	50.7	240.28	-	-	-
14 M	14 M-S	1460.00	25.3	61.0	73.2	289.33	38.4	85.6	102.2
	14 M-M	1330.00	22.9	50.6	64.5	281.66	-	-	-
	14 M-L	1300.00	21.9	30.3	50.8	231.96	-	-	-
16 M	16 M-S	1549.00	32.5	49.7	55.1	169.54	43.5	54.3	71.2
	16 M-M	1430.00	25.3	38.2	44.6	176.28	-	-	-
	16 M-L	1330.00	18.3	28.7	38.0	207.65	-	-	-
18 M	18 M-S	1408.00	16.1	21.4	22.5	139.75	21.9	26.3	29.9
	18 M-M	1340.00	13.2	14.8	16.3	123.48	-	-	-
	18 M-L	1278.00	12.9	13.5	15.6	120.93	-	-	-



ก) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อโฟม 1:1 โดยปริมาตร



ข) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อโฟม 1:1.5 โดยปริมาตร



ค) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อโฟม 1:2 โดยปริมาตร

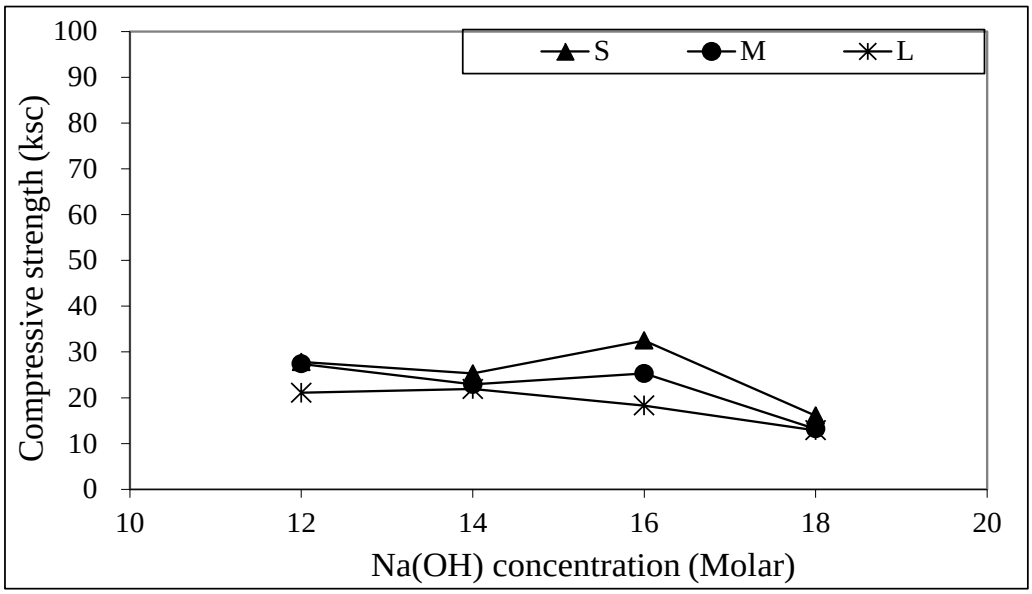
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

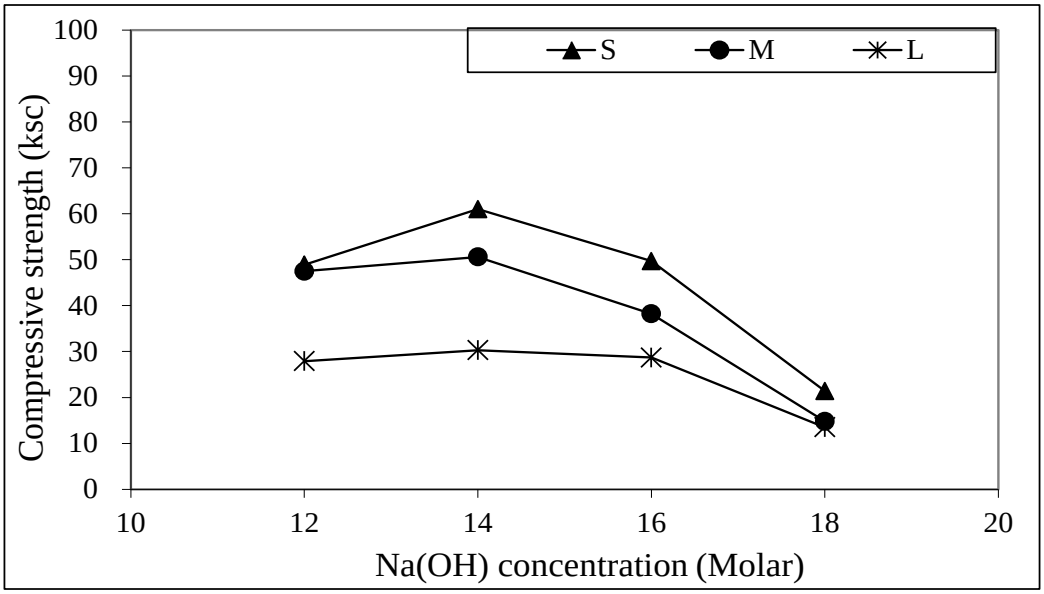
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่อายุ 3 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.3(ก) 4.3(ข) และ 4.3(ค) ตามลำดับ พบว่า ที่อายุช่วงต้น (3 วัน) ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมยังไม่ชัดเจนมากนัก โดยพบว่า กลุ่มที่ใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อโฟมไม่เกิน 1:1.5 โดยปริมาตร มีผลทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นถึง 18 โมลาร์ เมื่อพิจารณาที่อายุมากขึ้นเป็น 28 วัน ดังรูปที่ 4.3(ค) พบว่า ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรไม่เกิน 1:1.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 14 โมลาร์ และมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็นมากกว่า 14 โมลาร์ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt and Chalee, 2014 ; กนกเนตรและคณะ, 2557) เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1.5 และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 56.5 64.5 44.6 และ 16.3 กก/ซม^2 ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้น

ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นมากกว่า 14 โมลาร์ อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นการชะซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินลดลง เนื่องจากความหนืดของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไปขัดขวางการชะซิลิกาและอลูมินา ซึ่งสอดคลองกับงานวิจัยที่ผ่านมาของอุบลลักษณ์ และคณะ (2549) ซึ่งพบว่า การชะซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงสุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สูงถึง 16 โมลาร์ ดังนั้นที่ความเข้มข้นสูงขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรท์เซชั่นลดลง ทำให้เจลที่เป็นผลของปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติยึดประสานมีแนวโน้มลดลงด้วย นอกจากนั้นการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมาก อาจมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการเข้าไปชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะลื่นเมื่อสัมผัสกับความชื้น จึงมีผลให้การยึดประสานในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลง และส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงด้วย (Chindaprasirt and Chalee, 2014 ; ชรินทร์ และคณะ, 2553) ซึ่งผลดังกล่าวชัดเจนมากขึ้นในกลุ่มที่ใช้โฟมปริมาณมากเป็นมวลรวม (เถ้าถ่านหิน: โฟม เท่ากับ 1:2) โดยพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่สูงขึ้น มีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงอย่างชัดเจน

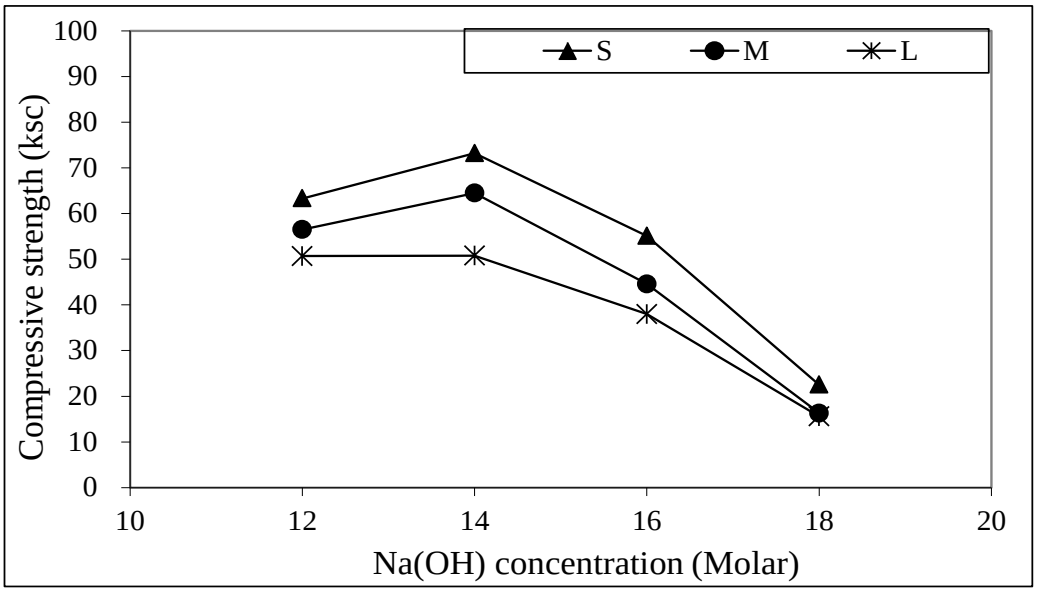
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในกลุ่มที่บ่มอุณหภูมิ 65 °ซ ดังรูปที่ 4.4 พบว่า มีแนวโน้มเดียวกันกับกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง กล่าวคือ กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ไม่เกิน 14 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ นอกจากนั้นเป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เพิ่มจาก 14 เป็น 18 โมลาร์ มีผลต่อการลดของกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในกลุ่มที่บ่มอุณหภูมิ 65 °ซ มากกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เพิ่มจาก 14 เป็น 18 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ที่อุณหภูมิบ่ม 65 °ซ ลดลงเท่ากับ 72.3 กก/ซม^2 (ลดลงจาก 102.2 กก/ซม^2 ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 14 โมลาร์ เป็น 29.9 กก/ซม^2 ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 18 โมลาร์) ในขณะที่กลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ลดลงเท่ากับ 50.7 กก/ซม^2 (ลดลงจาก 73.2 กก/ซม^2 ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 14 โมลาร์ เป็น 22.5 กก/ซม^2 ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 18 โมลาร์) ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงเกินไป และส่งผลให้เกิดการแตกร้าวที่ทำให้กำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ต่ำลงได้ (Bakharev, et al., 2005)



ก) อายุบ่ม 3 วัน

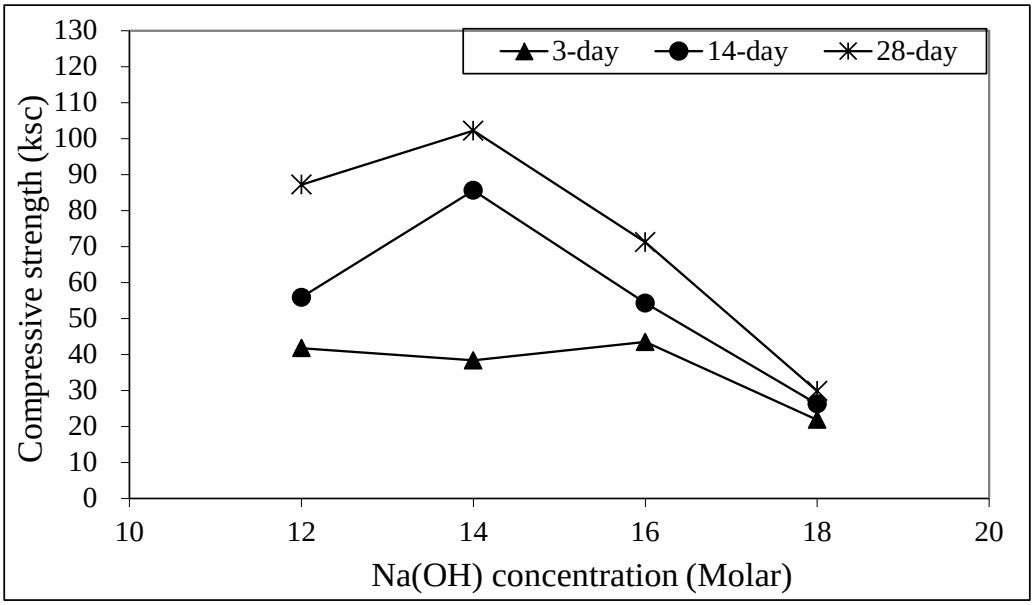


ข) อายุบ่ม 3 วัน



ค) อายุบ่ม 28 วัน

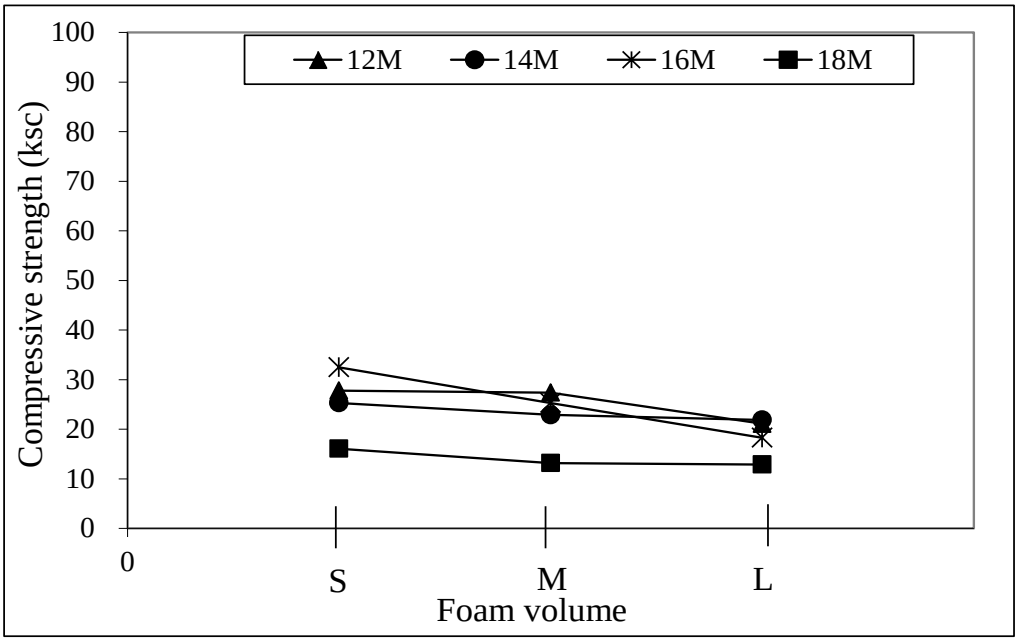
รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม



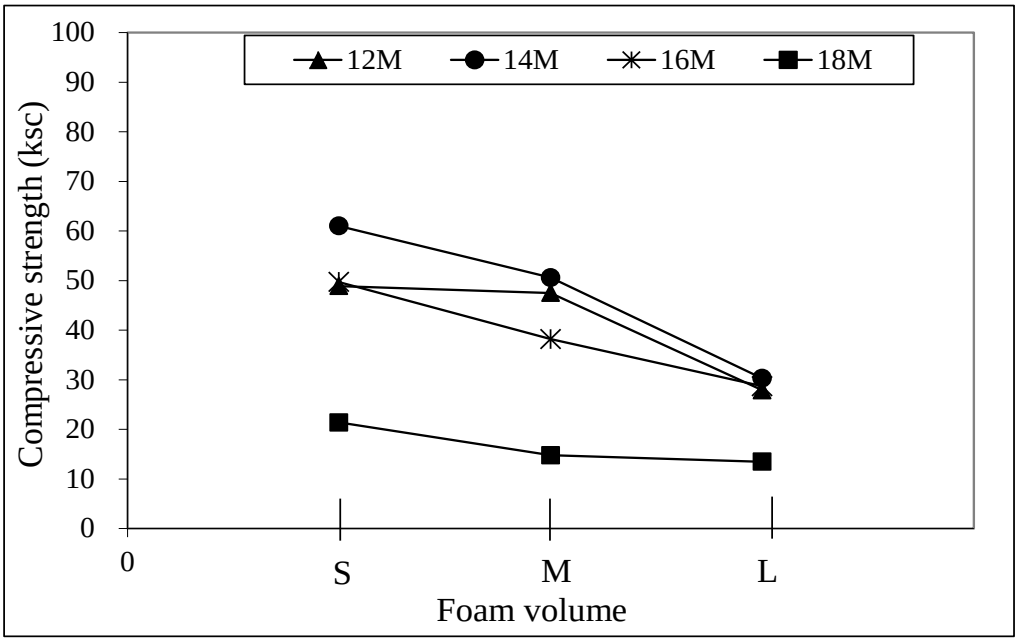
รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในกลุ่มที่บ่มอุณหภูมิ 65 °ซ

4.4 ผลของปริมาณโฟมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

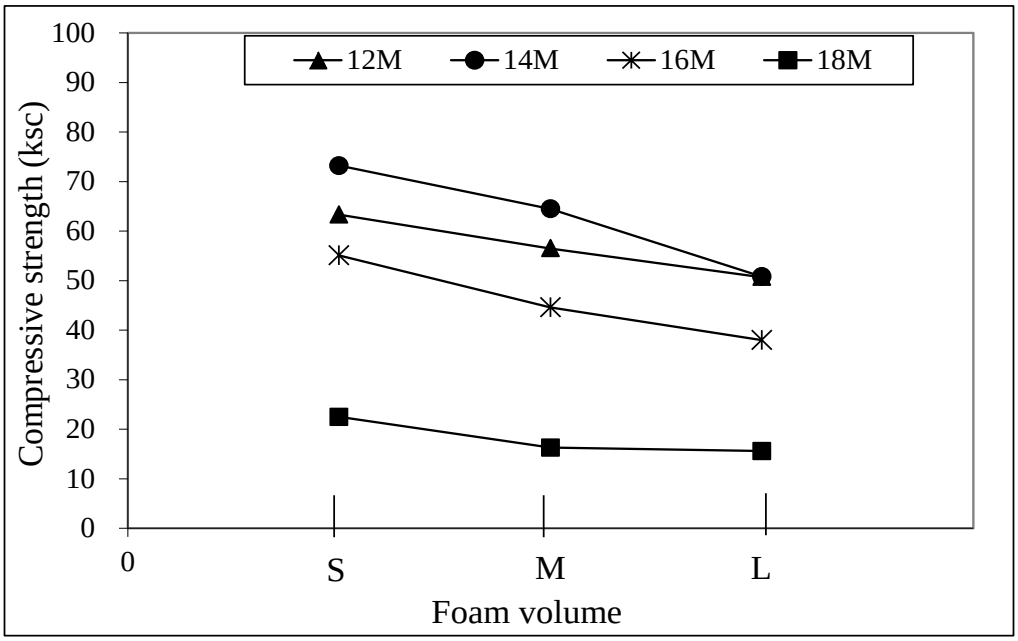
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณโฟม ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่บ่มในอากาศที่อายุ 3 14 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ก) 4.5(ข) และ 4.5(ค) ตามลำดับ พบว่า ปริมาณโฟมที่มากขึ้น มีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความเข้มข้นของของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 (S), 1:1.5 (M) และ 1:2 (L) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 73.2, 64.5 และ 50.8 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับคอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไป ที่ปริมาณของฟองอากาศในส่วนผสมคอนกรีตมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเพสต์ที่ยึดเกาะในส่วนผสมลดลง ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงด้วย อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณโฟมในส่วนผสมคอนกรีตที่มากขึ้นที่มากขึ้นมีผลให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลง ซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้ในงานก่อสร้างผนังที่ไม่รับน้ำหนัก ที่สามารถลดน้ำหนักของผนังได้ เมื่อพิจารณาผลการศึกษาครั้งนี้เทียบกับตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อคมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ศึกษาในครั้งนี้มีความหนาแน่นในช่วง 1200 ถึง 1600 กก/ม^3 ซึ่งเป็นคอนกรีตบล็อคมวลเบาชนิด C14 และ C16 โดยกำหนดให้กำลังอัดไม่ต่ำกว่า 51 กก/ซม^2 โดยตามรูปที่ 4.6 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมและกำลังอัดที่อายุ 28 วัน พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ให้ความหนาแน่นและกำลังอัดเป็นไปตาม มอก. 2601-2556 ได้แก่ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 และ 14 โมลาร์ ในทุกปริมาณโฟม และถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 16 โมลาร์ ต้องใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 (S) ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่า 14 โมลาร์ ให้กำลังอัดน้อยกว่า 51 กก/ซม^2 ซึ่งต่ำกว่า มอก. 2601-2556 กำหนด ถึงแม้ความหนาแน่นที่ได้จะต่ำและเป็นไปตาม มอก. 2601-2556 ก็ตาม



ก) อายุบ่ม 3 วัน

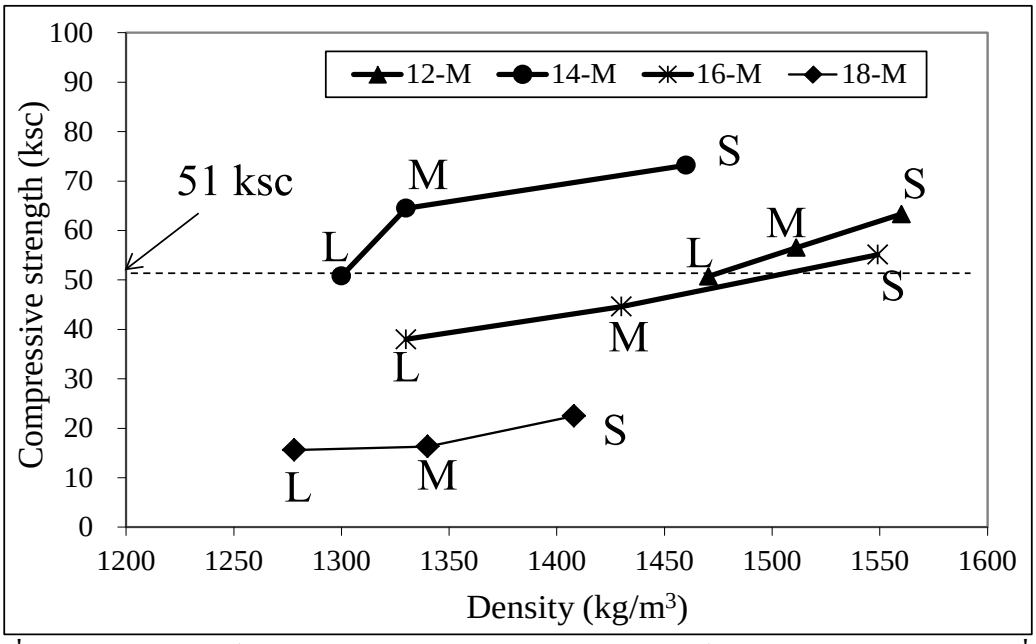


ข) อายุบ่ม 14 วัน



ค) อายุบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณโฟมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม



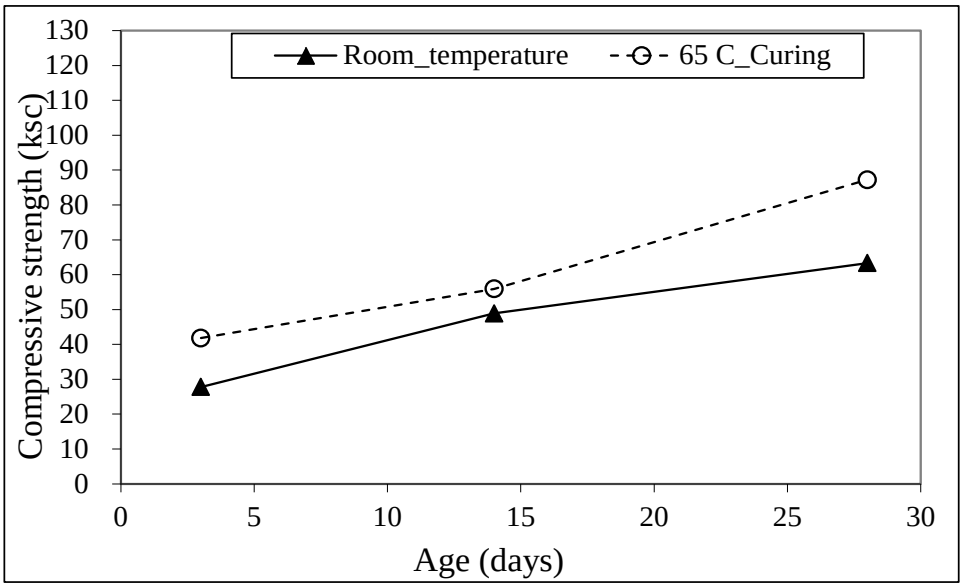
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมและกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

4.5 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

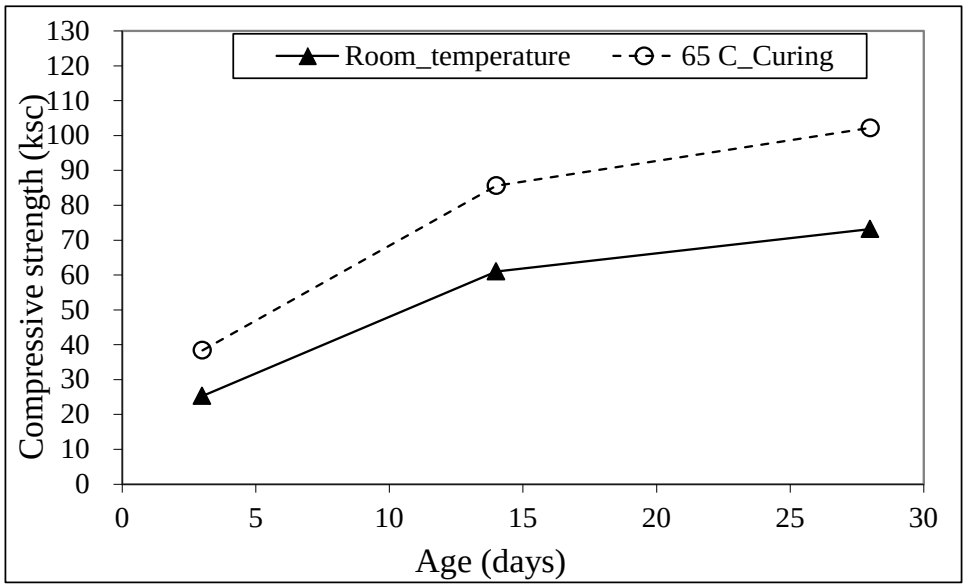
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม เท่ากับ 1:1 (S) โดยปริมาตร ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ดังรูปที่ 4.7(ก) 4.7(ข) 4.7(ค) และ 4.7(ง) ตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลชัดเจนในการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 3 14 และ 28 วัน เมื่อบ่มในอุณหภูมิห้องเท่ากับ 25.3 61.0 และ 73.2 กก/ซม^2 ตามลำดับ และเมื่อบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมกลุ่มนี้ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดที่อายุเดียวกันนี้สามารถเพิ่มขึ้นเป็น 38.4 85.6 และ 102.2 กก/ซม^2 ตามลำดับ

ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนในการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีกำลังอัดสูงขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในจีโอพอลิเมอร์เพสต์ขึ้นกับความละเอียดของวัสดุประสานที่ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาหรือชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกมาได้ง่าย นอกจากนั้น การให้ความร้อนในช่วงต้นกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าให้ความร้อนที่สูงมากเกินไปจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์สูญเสียความชื้นและเกิดการแตกตัวที่ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงได้ โดยจากการศึกษาที่ผ่านมา (Bakharev, et al., 2005) พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงและให้กำลังที่สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้

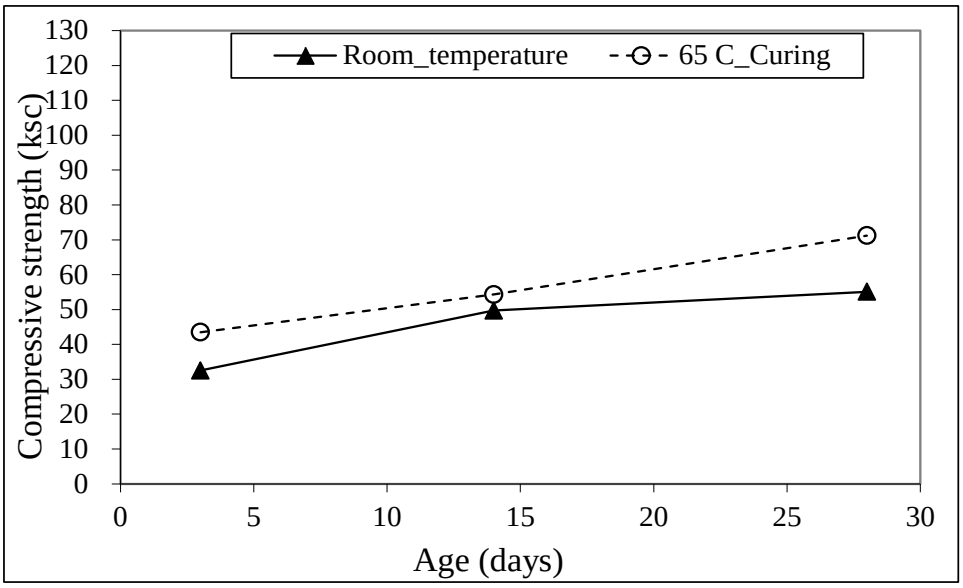
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่างกัน พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม ให้ผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีเข้มข้นต่ำมากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีเข้มข้นสูง (สังเกตจากเส้นกราฟของกลุ่ม NaOH เข้มข้นต่ำห่างกันมากกว่ากลุ่ม NaOH เข้มข้นสูง) ซึ่งน่าจะเกิดจากสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นต่ำ และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่น ที่ส่งผลให้จีโอพอลิมอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูงในอุณหภูมิห้องได้ดีอยู่แล้ว



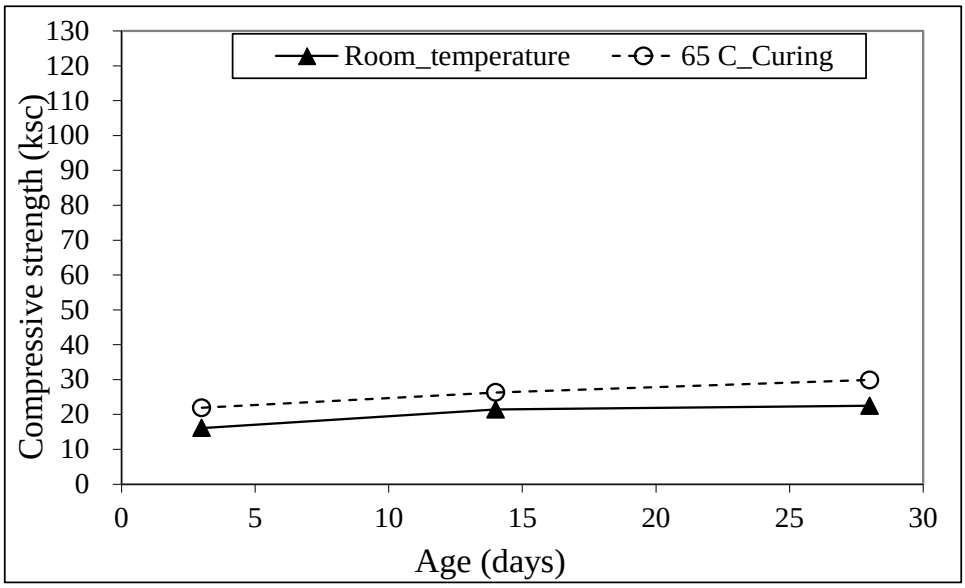
ก) สารละลาย NaOH เข้มข้น 12 โมลาร์



ข) สารละลาย NaOH เข้มข้น 14 โมลาร์



ค) สารละลาย NaOH เข้มข้น 16 โมลาร์



ง) สารละลาย NaOH เข้มข้น 18 โมลาร์

รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่บ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม เท่ากับ 1:1 (S) โดยปริมาตร

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผล

5.1.1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นไม่เกิน 14 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมสูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สูงถึง 16 และ 18 โมลาร์

5.1.2 ปริมาณโฟมที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลง

5.1.3 อุณหภูมิที่สูงขึ้น มีผลชัดเจนในการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำมากกว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง

5.1.4 การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อโฟมเท่ากับ 1:1 โดยปริมาตร ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมสูงที่สุดในกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องโดยมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 73.2 กก/ซม^2 และมีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นคอนกรีตบล้อคมวลเบาเพื่อใช้ในงานก่อสร้างต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาการทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น เช่น เถ้าถ่านหินจากแหล่งอื่นๆที่เผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย และ ดินเหนียวขาว เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายในการใช้วัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กนกเนตร ขี้นนกคุ้ม วริศรา โกระวิโยธิน และ วิเชียร ชาลี, 2557. ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 24(1) : 56-65.

ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมนา และ วิเชียร ชาลี, 2552. กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 15(1): 13-22.

ชรินทร์ เสนาวงษ์ อิทธิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี, 2552. การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเถ้าก้นเตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด", *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14*, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน้า 1587-1592

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2552. การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. *เอกสารประกอบการบรรยายวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 71-79.

ไชยยันต์ ชัยจักร, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, กุลพัฒน์ วัฒนกูล, 2546. การผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากการอุตสาหกรรมรีไซเคิลเหล็ก, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, ภาควิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, พฤษภาคม พ.ศ. 2546.

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

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

ยุวดี หิรัญ, 2551. การอัดบล้อคปูถนนคอนกรีตพรุน. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4*, 20-22 ตุลาคม พ.ศ. 2551, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ และ ฉัตรชัย ชูทอง, 2550. เว็ปไซต์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัยครั้งที่ 3 กองส่งเสริมและพัฒนางานวิจัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. *การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้ง 3* เรื่องการใช้เถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินในคอนกรีตบล็อกมวลเบา

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

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2556. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม *มอก. 2601-2556 คอนกรีตบล็อคมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ.* สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 57-2533 คอนกรีตบล้อครับน้ำหนัก. พิมพ์ครั้งที่ 7, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 58-2533 คอนกรีตบล้อคไม่รับน้ำหนัก. พิมพ์ครั้งที่ 7, สำนักงานมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ, 2552. จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1831-1836.

สุรพันธ์ สุคันธปรีย์, จตุพล ตั้งปกาศิต, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546. การศึกษาคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสม. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา* ปีที่ 14 ฉบับที่ 3: หน้า 1-7

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ ชาญชัย พลตรี และ วิเชียร ชาลี, 2548. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10*, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้ จอมเทียน พัทยา ชลบุรี

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

ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

Bakharev, T., 2005. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cem Concr Res*, Vol. 35, pp.1224-1232.

Chindaprasirt P., 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 : 303–310.

Chindaprasirt P., Chalee W., Jaturapitakkul C., Rattanasak U., 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Manage*; 29: 539-543.

Davidovits J. 1991. Geopolymer inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal*, 37 : 1633-1659.

Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, and Young Soo Chung, 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Constrction and Building Materials,* 47 : 409-418.

Lea F.M. (1970). The Chemistry of Cement and Concrete. Edward Arnold Publishers. pp. 361, 414-423.

Neville A.M., (1996), Properties of concrete, 4th Edition. Longman, Malasia, pp. 563-575

Posi P., Ridtirud C., Ekvong C., Chammanee D., Janthowong K., Chindaprasirt C. 2015. Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. *Construction and Building Materials,* 94 : 408-413.

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

Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P., 2010. Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp.236-240.

Zhihua Pan, Hengzhi Li, Weiqing Liu, 2014. Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials,* 72 : 256-261.

Xuemei Chen, Yun Yan, Yuanzheng Liu, Zhihua Hu, 2014. Utilization of circulating fluidized bed fly ash for the preparation of foam concrete. *Construction and Building Materials*, 54 : 137-146.

ภาคผนวก ก

ผลผลิต (Output)

บทความประกอบการประชุมสัมนาทางวิชาการระดับชาติ

1) Ponhsampatea Ly, นิชา สุระกิจ และ วิเชียร ชาลี. (2559). จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11*, ชลบุรี (MAT 026)

งานประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปีครั้งที่ 11th Annual Concrete Conference

17-19 กุมภาพันธ์ 2559
ณ โรงแรมสีมาธานี
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

TCA สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย Thailand Concrete Association

SIRDC KHON KAEN UNIVERSITY

จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

08.30-10.15 น.	การนำเสนอบทความวิจัย (ห้อง SIMA 2)
ประธานภาค : ผศ.ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล	
รองประธานภาค : ดร.จิระยุทธ สืบสุข	
08.30-08.45 น.	MAT-005 คุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาที่ผสมขยะโฟม *พัชรพล โพธิ์ศรี, เจริญชัย ฤทธิรุทธ, ณัฐฐา สิทธิราช, อารญา มั่นถาวรวงศ์, ศิริวรรณ พันธ์ปรีชา, ปริญญา จินดาประเสริฐ*
08.45-09.00 น.	MAT-007 การศึกษาผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าหนักแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ *สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์*
09.00-09.15 น.	MAT-024 การใช้เศษแก้วบดจากหลอดฟลูออเรสเซ็นต์แทนทรายในซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ *ธวัชชัย โทอินทร์, กรกนก บุญเสริม, วันชัย สะตะ, ปริญญา จินดาประเสริฐ*
09.15-09.30 น.	MAT-026 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน *Ponhsampatea Ly, นิชา สุระกิจ, วิเชียร ชาลี*
09.30-09.45 น.	MAT-027 ผลของการปรับปรุงคุณภาพและลำดับการผสมเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ *ประมวล พันชนะ, เกียรติสุดา สมนา*
09.45-10.00 น.	MAT-039 ผลของอุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์จากดินลูกรังผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อกำลังรับแรงอัดและการชะละลายในระบบแช่น้ำ *Charoenchai Ridtirud, Patcharapol Posi, Kanchana Pratumhual, Pattavee Butsanlee*
10.00-10.15 น.	STR-002 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ *วิชญ์พล ชุลีพันธุมาศ, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา*

10.15-10.30 พักน้ำชา – กาแฟ

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน

Ponhsampatea Ly (Ponhsampatea Ly)[1]

นิชา สุระกิจ (Nicha Surakit)[2]

วิเชียร ชาลี (Wichian Chalee)[3*]

[1, 2]*นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*

[3*]*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณโฟม และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ NaOH โดยใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ใช้เม็ดโฟมเป็นมวลรวมในส่วนผสมในอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม เท่ากับ 1:1(S) 1:1.5 (M) และ 1:2 (L)โดยปริมาตร หล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในแบบหล่อขนาด 100 × 100 × 100 มม. บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 14 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน 14 โมลาร์ และมีค่าลดลงเมื่อใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ ตลอดจนปริมาณโฟมที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลง การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อโฟมเท่ากับ 1:1 โดยปริมาตร ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมสูงที่สุด

ABSTRACT : This research aimed to study the effect of foam content and sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength of geopolymer concrete foam. The geopolymer concrete foam were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2Sio_3) and NaOH solution. The concentration of NaOH was varies at 12, 14, 16 and 18 molar. The ratio of 1:1 (S), 1:1.5 (M) and 1:2 (L) by volume of fly ash : foam were used as an aggregate. The concrete foam specimens of 100 × 100 × 100 mm were cast for air-cured compressive strength at 3, 14 and 28 days. The results showed that the compressive strength of geopolymer concrete foam increase with the increase in NaOH concentration as high as 14 molar and were found to decrease when the NaOH concentration was up to 18 molar. An increase in foam contents result in decreased density and compressive strengths of geopolymer concrete foam. This study found that geopolymer concrete foam with NaOH concentration of 14 molar and volume ratio of fly ash : foam of 1:1 provided the highest compressive strength.

KEYWORDS : Geopolymer concrete foam, Fly ash, Compressive strength, NaOH concentration

1. บทนำ

คอนกรีตโฟม หรือโฟมกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) ที่ผ่านกรรมวิธีเคลือบผิวภายนอกด้วยสารพิเศษ แทนมวลรวมในการผลิตคอนกรีต ซึ่งจุดเด่นของคอนกรีตโฟมเป็นการผลิตวัสดุก่อสร้างที่ลดการนำความร้อน และลดน้ำหนักของวัสดุก่อสร้างที่ทำให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ลดลง ตลอดจนโฟมมีน้ำหนักเบาจึงทำให้สามารถขนส่งได้ง่าย อย่างไรก็ตาม เม็ดโฟมมีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมจากหินและทราย เนื่องจากมีอากาศอยู่ภายในเม็ดโฟมมาก จึงมีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตโฟมต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป กำลังรับแรงของคอนกรีตโฟมขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุประสานที่ใช้ในการผสม โดยวัสดุประสานที่มากขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตโฟมสูงขึ้น และมีความหนาแน่นสูงขึ้น [1- 3] ด้วย คอนกรีตโฟมไม่เหมาะสมในการใช้เป็นคอนกรีตโครงสร้างในการรับแรงเชิงกล เนื่องจากมีกำลังอัดที่ต่ำ ความทึบน้ำต่ำ ที่ส่งผลให้มีการกัดกร่อนต่อเหล็กเสริมคอนกรีตได้ง่าย ดังนั้น การใช้งานคอนกรีตโฟมจึงมีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำผนัง เช่น อิฐก่อผนัง หรือ ผนังสำเร็จรูป ส่งผลให้ลดการนำความร้อนของผนังทำให้อาคารเย็นลง และประหยัดพลังงานได้ คอนกรีตโฟมจึงมีจุดเด่นในเรื่องของการผลิตวัสดุก่อสร้างเพื่อใช้ในอาคารที่ต้องการประหยัดพลังงานจากระบบปรับอากาศ

ปัจจุบันคอนกรีตโฟมได้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตโฟม ขึ้นกับปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีด้านวัสดุประสานในงานคอนกรีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการทำวัสดุประสานโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมที่เรียกว่า วัสดุจีโอ-พอลิเมอร์ ซึ่งใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ โดยปัจจุบันพบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้ในอุณหภูมิปกติ โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการช่วยเร่งปฏิกิริยาอีกต่อไป [4] การใช้จีโอ-พอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้าง เป็นการส่งเสริมการใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ใช้วัสดุตั้งต้น ที่เป็นผลพลอยได้หรือของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า (เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น) จะช่วยลดปัญหาการกำจัดทิ้งของเถ้าต่างๆเหล่านี้ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่ได้ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม จึงเป็นการส่งเสริมการลดใช้ปูนซีเมนต์ลง และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อีกทางด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้วัสดุประสานจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน ในการผลิตคอนกรีตโฟม โดยศึกษาผลของปริมาณโฟม และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานได้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [5] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3

และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 70.91 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [5] โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°ซ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) ที่มีลักษณะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มม. และมีความหนาแน่น 15.5 กก/ม^3 เป็นมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

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

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

เตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้เม็ดโฟมพลาสติก (EPS Foam) ซึ่งมีความหนาแน่น 15.5 กก/ม^3 เป็นมวลรวมหยาบ และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโฟม 3 ค่า คือ 1:1 (S) 1:1.5 (M) และ 1:2 (L) โดยปริมาตร โดยปรับเป็นส่วนผสมโดยน้ำหนักได้ดังตารางที่ 2 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมทรงลูกบาศก์ขนาด 100 × 100 × 100 มม. สำหรับทดสอบกำลังอัด ตามส่วนผสมคอนกรีตโฟมในตารางที่ 2 หลังจากนั้น บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศโดยใช้พลาสติกใสพันรอบไว้ โดยทดสอบกำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมแสดงดังภาพที่ 1

ตารางที่ 2 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม					
	เถ้าถ่านหิน (กก.)	เม็ดโฟม (กก.)			NaOH (กก.)	Na_2O: SiO_2 (กก.)
		S (1:1)	M (1:1.5)	L (1:2)		
12 M-S	772	5.5	-	-	67	167
12 M-M	772	-	8.1	-	67	167
12 M-L	772	-	-	11.0	67	167
14 M-S	772	5.5	-	-	67	167
14 M-M	772	-	8.1	-	67	167
14 M-L	772	-	-	11.0	67	167
16 M-S	772	5.5	-	-	67	167
16 M-M	772	-	8.1	-	67	167
16 M-L	772	-	-	11.0	67	167
18 M-S	772	5.5	-	-	67	167
18 M-M	772	-	8.1	-	67	167
18 M-L	772	-	-	11.0	67	167

ภาพที่ 1 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

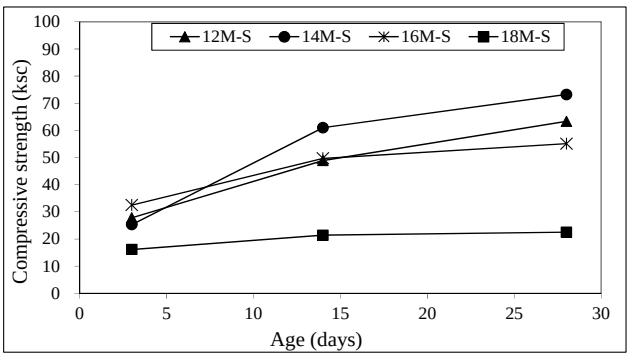
3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

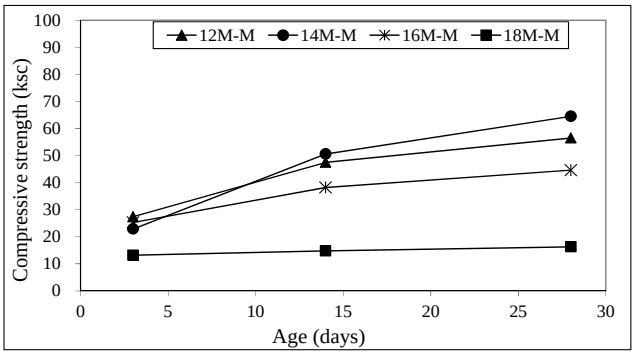
พิจารณากำลังอัดของจีโอพอลิมอร์คอนกรีตโฟมดังตารางที่ 3 และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมหลังบ่มในอากาศ เป็นเวลา 3, 14 และ 28 วัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ดังภาพที่ 2 พบว่า ทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา โดยอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 14 วัน จะสูงกว่า ช่วง 14 ถึง 28 วัน ทั้งนี้อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่น ที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานเกิดขึ้นในช่วงต้น และมีผลในการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้น [6] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม พบว่า ที่ความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ มีผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกกลุ่มการแทนที่มวลรวมดังภาพที่ 2(ก) ถึง 2(ค) โดยสังเกตได้จากร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 3 วัน (ตารางที่ 3) ที่ต่ำกว่ากลุ่มอื่น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อโฟม เท่ากับ 1:1 (S) โดยปริมาตร และใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 12, 14 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 3 วัน เท่ากับ 227, 289, 169 และ 139 ตามลำดับ การที่การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้สารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ อาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจทำให้สมบัติในการยึดประสานลดลงได้ [7] โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่ทุกอายุการทดสอบ ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นอื่นค่อนข้างชัดเจน

ตารางที่ 3 กำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

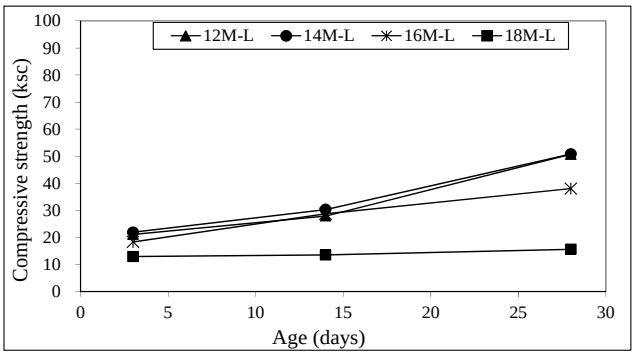
ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก./ม^3)	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})			กำลังอัดที่ 28 วัน เทียบกับ 3 วัน (ร้อยละ)
		3 วัน	14 วัน	28 วัน	
12 M-S	1560	27.8	48.9	63.3	227
12 M-M	1511	27.4	47.5	56.5	206
12 M-L	1470	21.1	27.9	50.7	240
14 M-S	1460	25.3	61.0	73.2	289
14 M-M	1330	22.9	50.6	64.5	281
14 M-L	1300	21.9	30.3	50.8	231
16 M-S	1549	32.5	49.7	55.1	169
16 M-M	1430	25.3	38.2	44.6	176
16 M-L	1330	18.3	28.7	38.0	207
18 M-S	1408	16.1	21.4	22.5	139
18 M-M	1340	13.2	14.8	16.3	123
18 M-L	1278	12.9	13.5	15.6	120



ก) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อโฟม 1:1 โดยปริมาตร



ข) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อโฟม 1:1.5 โดยปริมาตร



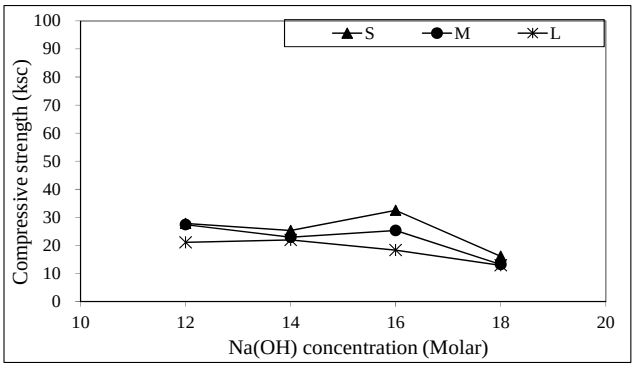
ค) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อโฟม 1:2 โดยปริมาตร

ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

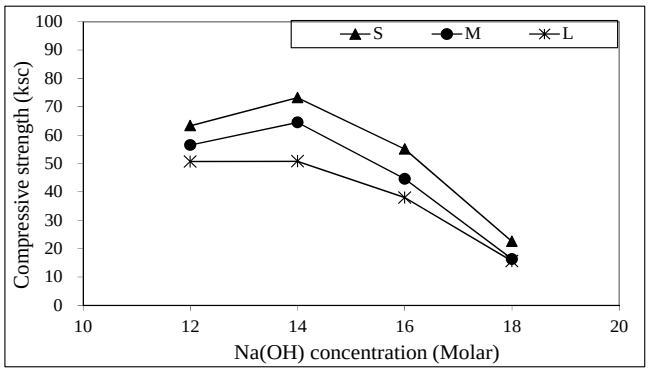
3.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่อายุ 3 และ 28 วัน ดังภาพที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ พบว่า ที่อายุช่วงต้น (3 วัน) ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมยังไม่ชัดเจนมากนัก โดยพบว่า กลุ่มที่ใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อโฟมไม่เกิน 1:1.5 โดยปริมาตร มีผลทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นถึง 18 โมลาร์ เมื่อพิจารณาที่อายุมากขึ้นเป็น 28 วัน ดังภาพที่ 3(ข) พบว่า ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีแนวโน้มชัดเจนมากขึ้น โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรไม่เกิน 1:1.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 14 โมลาร์ และมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็นมากกว่า 14 โมลาร์ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7, 8] เช่น จีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1.5 และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 56.5, 64.5, 44.6 และ 16.3 กก/ซม^2. ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นมากกว่า 14 โมลาร์ อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นการชะซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินลดลง เนื่องจากความหนืดของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไปขัดขวางการชะซิลิกาและอลูมินา ซึ่งสอดคลองกับงานวิจัยที่ผ่านมาของอุบลลักษณ์ และคณะ (2549) [9] ซึ่งพบว่า การชะซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงสุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สูงถึง 16 โมลาร์ ดังนั้นที่ความเข้มข้นสูงขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรท์เซชั่นลดลง ทำให้เจลที่เป็นผลของปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติยึดประสานมีแนวโน้มลดลงด้วย นอกจากนั้นการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมาก อาจมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการเข้าไปชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะลื่นเมื่อสัมผัสกับความชื้น จึงมีผลให้การยึดประสานในจีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตโฟมลดลง และส่งผลให้กำลังอัดของจีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงด้วย [10] ซึ่งผลดังกล่าวชัดเจนมากขึ้นในกลุ่มที่ใช้โฟมปริมาณมากเป็นมวลรวม (เถ้าถ่านหิน:โฟม เท่ากับ 1:2) โดยพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่สูงขึ้น มีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงอย่างชัดเจน



ก) อายุบ่ม 3 วัน



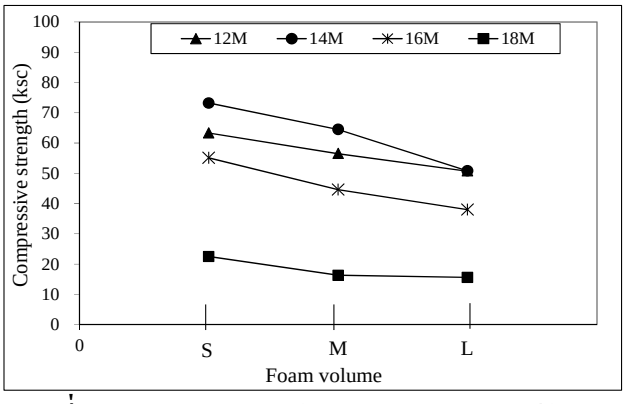
ข) อายุบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 3 ผลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

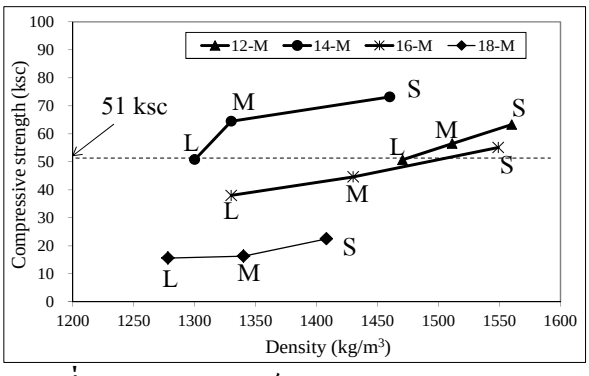
3.3 ผลของปริมาณโฟมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟม

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณโฟม ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่บ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ปริมาณโฟมที่มากขึ้นมีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความเข้มข้นของของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 (S), 1:1.5 (M) และ 1:2 (L) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 73.2, 64.5 และ 50.8 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับคอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไป ที่ปริมาณของฟองอากาศในส่วนผสมคอนกรีตมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเพสต์ที่ยึดเกาะในส่วนผสมลดลง ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงด้วย อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณโฟมในส่วนผสมคอนกรีตที่มากขึ้นที่มากขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลง ซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้ในงานก่อสร้างผนังที่ไม่รับน้ำหนัก ที่สามารถลดน้ำหนักของผนังได้ เมื่อพิจารณาผลการศึกษาครั้งนี้เทียบกับตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อคมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) [11] พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ศึกษาในครั้งนี้มีความหนาแน่นในช่วง 1200 ถึง 1600 กก./ม^3 ซึ่งเป็นคอนกรีตบล็อคมวลเบาชนิด C14 และ C16 โดยกำหนดให้กำลังอัดไม่ต่ำกว่า 51 กก/ซม^2 โดยตามภาพที่ 5 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของจีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตโฟมและกำลังอัดที่อายุ 28 วัน พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ให้ความหนาแน่นและกำลังอัดเป็นไปตาม มอก. 2601-2556 ได้แก่ จีโอ-พอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 และ14 โมลาร์ ในทุกปริมาณโฟม และถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 16 โมลาร์ ต้องใช้เถ้าถ่านหินต่อโฟมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 (S) ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่า 14 โมลาร์ ให้กำลังอัดน้อยกว่า 51 กก/ซม^2 ซึ่งต่ำกว่า มอก. 2601-2556 กำหนด

ถึงแม้ความหนาแน่นที่ได้จะต่ำและเป็นไปตาม มอก. 2601-2556 ก็ตาม



ภาพที่ 4 ผลของปริมาณโฟมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมและกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

4. สรุปผล

1) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นไม่เกิน 14 โมลาร์ ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมสูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สูงถึง 16 และ 18 โมลาร์

2) ปริมาณโฟมที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมลดลง

3) การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อโฟมเท่ากับ 1:1 โดยปริมาตร ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมสูงที่สุด โดยมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 73.2 กก./ซม.^{2}

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 131/2559

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Posi, C. Ridtirud, C. Ekvong, D. Chammanee, K. Janthowong, P. Chindaprasirt, 2015. Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. Construction and Building Materials, 94 : 408-413.

[2] Zhihua Pan, Hengzhi Li, Weiqing Liu, 2014. Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. Construction and Building Materials, 72 : 256-261.

[3] Xuemei Chen, Yun Yan, Yuanzheng Liu, Zhihua Hu, 2014. Utilization of circulating fluidized bed fly ash for the preparation of foam concrete. Construction and Building Materials, 54 : 137-146.

[4] J. Davidovits, 1991. Geopolymer inorganic polymeric new materials. J Therm Anal, 37 : 1633-1659.

[5] ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in

Concrete, C 618-00. Annual Book of ASTM Standards 2001, 04.02.

[6] Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, and Young Soo Chung, 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. Constrction and Building Materials, 47 : 409-418.

[7] P. Chindaprasirt, W. Chalee, 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 : 303–310.

[8] กนกเนตร ขี้นนกคุ้ม วริศรา โกระวิโยธิน และ วิเชียร ชาลี, 2557. ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 24(1) : 56-65.

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

[10] ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมนา และ วิเชียร ชาลี, 2553. กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 15(1): 13-22.

[11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2556. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2601-2556 คอนกรีตบล็อคมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.

ภาคผนวก ข

รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2559A10802113 สัญญาเลขที่ 131/2559

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน

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

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2558 **ถึงวันที่** (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2559

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

<u>รายรับ</u>

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...193,050 .....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2558...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...154,440.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2559.....

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

รวม ...347,490.....บาท

<u>รายจ่าย</u>

หมวด	**งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)**	**งบประมาณที่ใช้จริง (บาท)**	**จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน (บาท)**
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	120,000	120,000	0
3. ค่าวัสดุ	79,490	79,490	0
4. ค่าใช้สอย	148,000	148,000	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	38,610	38,610	0
รวม	386,100	386,100	0

(รศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน