



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการวิจัยเรื่อง

ผลของอุณหภูมิป้อนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน

(Effect of curing temperature on compressive strength of fly ash-based  
geopolymer mortar)

## หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณ  
แผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222655

สัญญาเลขที่ 130/2559

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลของอุณหภูมิอบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน

(Effect of curing temperature on compressive strength of fly ash-based  
geopolymer mortar)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤษภาคม 2559

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559  
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ผลของอุณหภูมิปัมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ่านหิน” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มีงบประมาณทั้งโครงการ 441,100 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ : นายวิเชียร ชาลี  
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน  
งบประมาณ : 441,100 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลของอุณหภูมิบ่มและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ และใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวม หล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มม<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 28 และ 60 วัน ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง 30 °ซ 65 °ซ และ 90 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มต่อเนื่องในอากาศจนถึงอายุทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65 °ซ ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มสูงถึง 90 °ซ

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์, เถ้าถ่านหิน, กำลังอัด, อุณหภูมิบ่ม, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

## Abstract

This research aimed to study the effect of temperature curing and sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. The geopolymer mortar was prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide (NaOH) solution. The concentration of NaOH was varied at 10, 12, 14, 16 and 18 molar. River sand was used as an aggregate. The geopolymer mortar cube specimens of  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  were cast for compressive strength test at 7, 14, 28 and 60 days. The samples were air cured at room temperature,  $30^\circ\text{C}$ ,  $65^\circ\text{C}$  and  $90^\circ\text{C}$  for 48 hours and continuous curing in air until the age test. The results showed that the compressive strength of geopolymer mortar increase with the increase in NaOH concentration as high as 16 molar. The increase in temperature curing as high as  $65^\circ\text{C}$  result in increased compressive strength but they were found to decrease when the temperature curing was up to  $90^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** Geopolymer mortar, Fly ash, Compressive strength, Temperature curing, NaOH concentration

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 130/2559

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานวัสดุอีพอกซีเพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต หรือวัสดุก่อสร้างอื่นๆ ให้สามารถใช้งานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

## สารบัญ

### สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 จีโอโพลิเมอร์	4
2.2 แก้วถ่านหิน	11
2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์	20
2.4 โซเดียมซัลไฟด์	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	<b>26</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	26
3.3 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	29

<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล</b>	<b>36</b>
4.1 สมบัติของวัสดุประสาน	36
4.2 การพัฒนากำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	38
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	41
4.4 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	45
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>49</b>
5.1 สรุปผล	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>50</b>
<b>ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)</b>	<b>53</b>
<b>ภาคผนวก ข รายงานการเงิน</b>	<b>68</b>
<b>ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย</b>	<b>70</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์	7
2.2 สมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหิน	18
3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	30
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน	37
4.2 สมบัติของมวลรวม	38
4.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	39

## สารบัญรูปร่าง

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์	6
2.2 โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือโพลีไซอะเลต	8
2.3 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต	9
2.4 รูปขยายอนุภาคของถ้ำถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal	13
2.5 รูปขยายอนุภาคของถ้ำถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed	14
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	28
3.2 ขั้นตอนการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	32
3.3 การหล่อตัวอย่างทดสอบ	35
4.1 รูปขยายอนุภาคของถ้ำถ่านหินแม่เมาะ	36
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุทดสอบของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำถ่านหิน	41
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	44
4.4 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	47
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มใน จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์	48

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเถาถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจัง โดยมีผลงานวิจัยที่ยืนยันได้ว่า เถาถ่านหินแม่เมาะเป็นเถาถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุดใน เนื่องจากมีอนุภาคที่กลมตันและมีความละเอียด ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นในระยะยาว มีความทึบน้ำที่ดี และลดความร้อนในคอนกรีตหยา (Cheewaket et al., 2014 ; Chalee et al., 2010 ; ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) อย่างไรก็ตาม การใช้เถาถ่านหินในงานคอนกรีตในประเทศไทยยังคงมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมด้วย เนื่องจากต้องการสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกันสารประกอบซิลิกาหรืออลูมินาในเถาถ่านหิน แนวคิดในการพัฒนาการใช้งานของเถาถ่านหินโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นแนวทางที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากจะสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนลงได้ ตลอดจนเป็นการสร้างมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ได้จากซิลิกา (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และวัสดุปอซโซลาน โดยการนำสารละลายแอลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงมากระตุ้นวัสดุปอซโซลาน ที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถาถ่านหินหรือเถ้าชีวมวล หรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติอื่นๆ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม วัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอลูมินากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนชัน และได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ (Davidovits, 1991)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลที่สามารถพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้ใช้งานจริงในอนาคตได้ โดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้ความร้อนในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน จะส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นได้ในช่วงระยะต้นๆ หลา (Chindaprasirt et al., 2009 ; Bakharev, 2005; Rattanasak et al., 2009) ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญในการรับแรงของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ก็อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและสูญเสียการรับแรงได้ นอกจากนั้นการบ่มจีโอพอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูง อาจทำให้ยากต่อการพัฒนาเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมจริง รวมทั้งเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นควรมีการศึกษา

อุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถพัฒนาการใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ และให้ผลการรับแรงเชิงกลที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ บ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้เถ้านหินแม่เมาะ ที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดี มีความเหมาะสมในการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์มากที่สุดในประเทศไทย โดย การศึกษามุ่งประเด็นที่ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน เพื่อให้ ได้อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ภายใต้การรับแรงเชิงกลที่เหมาะสมกับ การประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างชนิดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิบ่ม ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน
- 1.2.2) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของ โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน โดย หล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหินแม่เมาะ, โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งกำหนดอัตราส่วน โดยโมลาร์ของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  คงที่ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เป็น มวลรวม โดยใช้อัตราส่วน เถ้านหิน:ทราย เท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการ เตรียมมอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C109 หลังจากนั้นทำการหล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มม.<sup>3</sup> ทำการถอดแบบหลังหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง และแบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อบ่มที่ อุณหภูมิห้อง, 30, 65 และ 90 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มในอากาศต่อเนื่องโดยใช้พลาสติกใสปั้นรอบจนถึงอายุ ทดสอบกำลังอัด โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงอุณหภูมิบ่มและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหิน เพื่อให้ได้วัสดุประสานที่มีกำลังอัดสูง ภายอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมที่สามารถเป็นฐานข้อมูลในการ นำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.4.2 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 จีโอโพลิเมอร์ (อุบลลักษณ์, 2549)

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์สารปอซโซลานที่นิยมใช้กันได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอโพลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งพบครั้งแรกโดย Glukhovsky (1950) ซึ่งสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ นิยามของจีโอโพลิเมอร์ กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davitodovits (1970) คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางธรณีเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่รูปอสัณฐาน จีโอโพลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมิเนียมมากกระตุ้นด้วยค่ากระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอโพลิเมอร์แตกต่างกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าถ่านหินซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแกลบ เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แร่ดินเบาจากพื้นที่ภาคเหนือ และดินขาวจากพื้นที่บริเวณจังหวัดระนอง เป็นต้น

ส่วนผสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จะใช้เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาถ่านหินชนิดใดก็ได้ เถ้าถ่านหินมีสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือ เทา น้ำตาล ถึง น้ำตาลแดง หรือน้ำตาลเหลือง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน วิธีการเผาและอุณหภูมิขณะเผาถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยปกติจะมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินประกอบด้วย

ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาไดรอกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริสไดรอกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ผลรวมของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 90 โดยน้ำหนัก

### 2.1.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์, 2549)

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารที่เชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ ดังสมการ



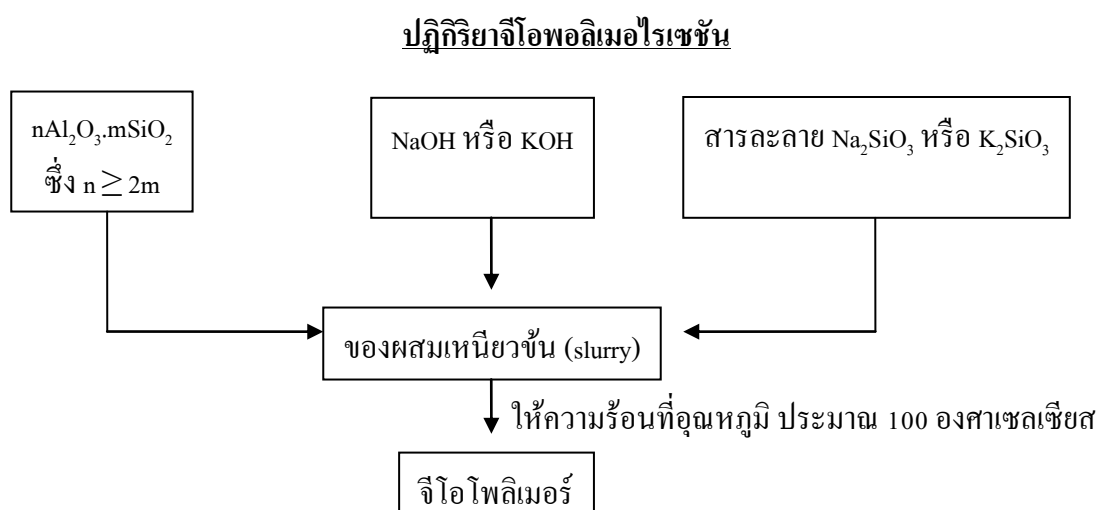
โดยที่ M	คือ ธาตุอัลคาไล
-	คือ การยึดเกาะพันธะ
z	คือ จำนวนโมเลกุล
n	คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
w	คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้ได้ตลอดจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในการทำจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเข้ากับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60 ถึง 90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali Silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยแผนผังการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้แสดงในรูปที่ 2.1

สารปอซโซลานโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการช่วยยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

### 2.1.2 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์, 2549)

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกันโดยปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรง คล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ปกติ สารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ  $\text{AlO}_4$  และ  $\text{SiO}_4$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2 รูปอยู่ไหนสารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมาก และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต



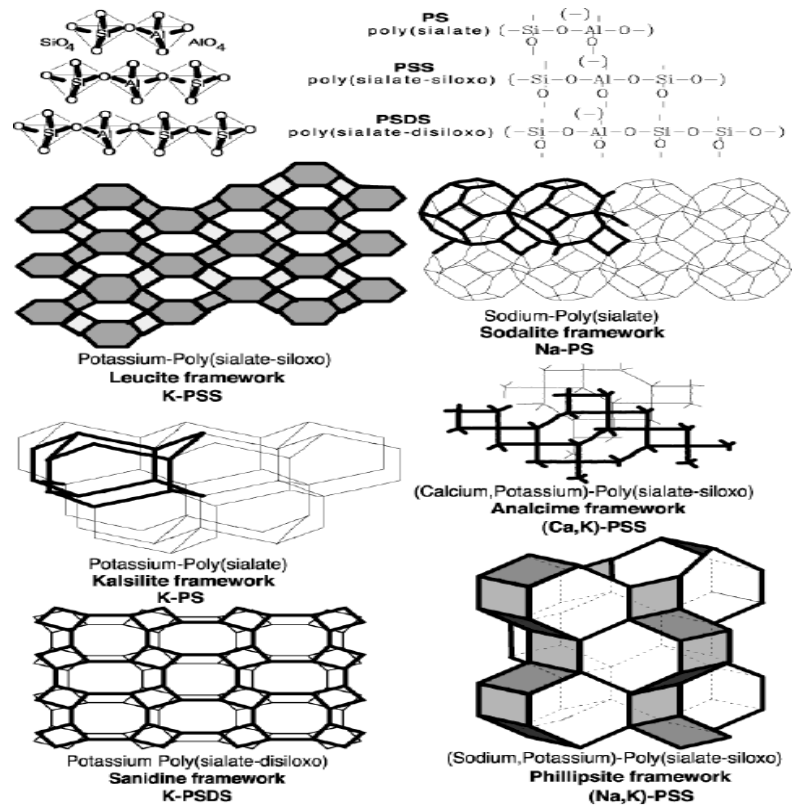
รูปที่ 2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์, 2549)

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์



ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิเกต
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ใน สารละลาย	การชะของแข็งที่ Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟสดี
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควมแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาในเฟสดี
อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	90 - 300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ
ช่วงความเป็นกรด-เบส	6 - 11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่ แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	ของผสมของเฟลเจลแบบอสัณฐาน และกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต (อุบลักษณ์, 2549)

### 2.1.3 คุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (อุบลักษณ์, 2549)

#### ด้านการศึกษา

วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี วัสดุชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลิไซอะเลต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต  $[\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}]$  จากสูตร

$$M_n [-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2-]_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad (2.2)$$

ถ้า  $z$  มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลิไซอะเลต (PS)

ถ้า  $z$  มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลิไซอะเลตไซลอกโซ (PSS)

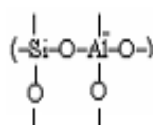
ถ้า  $z$  มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ อาทิเช่น อัตราส่วน 1, 2, และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ หากอัตราส่วนสูงกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมขวางขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

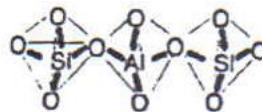
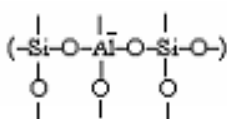
อัตราส่วน 2:1	เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต
อัตราส่วน 3:1	สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียม ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200- 1,000 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนระหว่าง 20:1 – 35:1	ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ใน 2 มิติ มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

อุณหภูมิในการผสมและวิธีการบ่มจะมีผลต่อคุณสมบัติของไฟเบอร์ที่ได้ เช่น ไฟเบอร์กลาสประเภท E จะต้องมีการทำการผสมและบ่มที่อุณหภูมิห้อง สำหรับประเภทคาร์บอนจะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส สำหรับประเภทเหล็กจะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 750 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส ส่วนประเภทซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) จะทำการผสมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 1,800 องศาเซลเซียส

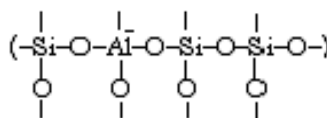
Si:Al = 1 โพลีไซอะเลต



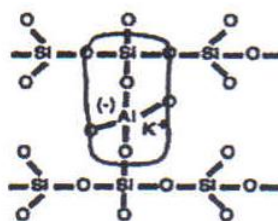
Si:Al = 2 โพลีไซอะเลตไซลอกโซ



Si:Al = 3 โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ



Si:Al > 3 โขะเลตเชื่อมขวางกัน



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีโซอะเลต (อุบลลักษณ์, 2549)

### ด้านอุตสาหกรรม (อุบลลักษณ์, 2549)

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิบ่มที่ต่ำ โดยสามารถผลิตวัสดุประเภทนี้จากสารประกอบที่มีซิลิกาหรือทั้งซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่สามารถละลายในสารละลายอัลคาไล จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น เช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์

วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ คือสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดที่เป็นที่ยอมรับได้ในเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่า วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่งและงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้คุณสมบัติที่ดีเช่นประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง มีความเสถียรทางความร้อน มีความทนทานเป็นเลิศ และมีความต้านทานต่อกรดสูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้นเซรามิกและซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังสามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และทนต่อเปลวไฟได้ถึง 50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควันเมื่อได้รับปลั๊กซ์ทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือนพอลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้น วัสดุ จีโอพอลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการใช้งานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

### ด้านเศรษฐศาสตร์และสังคม

#### - การปรับสภาพของเสียที่มีพิษ

การตรึง (Immobilisation) ของเสียที่มีพิษด้วยการผสมของเสียในวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือเฟลด์สปาทรอยด์ (Feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีที่ดี หรือทำของเสียเป็นก้อน (Solidify) ของเสียทางเคมีประเภทนี้ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของสารนิวเคลียร์

วัสดุอิพอลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถดึงของเสียที่มีพิษไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักก้อย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง 3 มิติของวัสดุอิพอลิเมอร์

#### - ปรากฏการณ์โลกร้อนและการประหยัดพลังงาน

ในปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ 1 ตัน จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สู่บรรยากาศ 1 ตัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) แต่สำหรับวัสดุประสานอิพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากการผลิตวัสดุอิพอลิเมอร์ ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุดิบสามารถหาได้ทั่วไป โดยเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และดินขาว เป็นต้น ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สู่บรรยากาศได้เป็นอย่างดี

#### - เศรษฐศาสตร์

การผลิตวัสดุอิพอลิเมอร์จะใช้ต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากจะใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ให้คุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวัสดุอิพอลิเมอร์จะต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบรูณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงมากนัก คือที่ประมาณ 45 ถึง 90 องศาเซลเซียส หากต้องการผลิตวัสดุอิพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น เสา คาน ผนัง และพื้นสำเร็จรูป สามารถใช้ผลิตเหมือนคอนกรีตสำเร็จ (Precast Concrete) ได้ ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันจะเห็นว่าคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมากเนื่องมาจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นวัสดุอิพอลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

## 2.2 เถ้าถ่านหิน (ปริญา, 2547)

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า เถ้าที่ได้นี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมกับน้ำ จึงเป็นแนวคิดในการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานก่อสร้างแทนปูนซีเมนต์และเพื่อลดปัญหาด้าน

มลภาวะได้อีกด้วยและถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา เรียกว่าถ่านก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอน หรือใหญ่กว่าถ่านหินประมาณ 16 เท่า

### 2.2.1 ถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่

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

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากนี้ถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุด และมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

### 2.2.2 การเผาถ่านหิน (ปริญญญา, 2547)

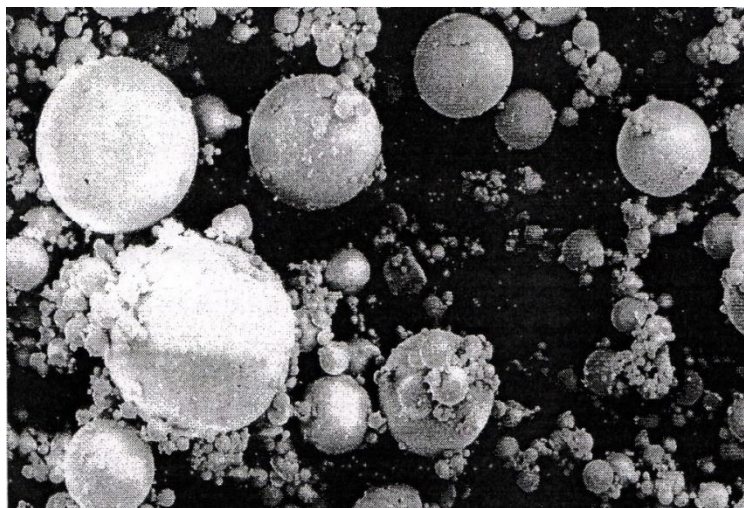
การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

#### 1. การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นถ่านก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นถ่านลอยซึ่งในระบบการเผาจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใส ๆ (Vitreous particle)

#### 2. การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นถ่านลอย ที่เหลือจะเป็นถ่านหนักหรือถ่านก้นเตาถ่านลอยที่ได้จากการเผาประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นถ่านลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

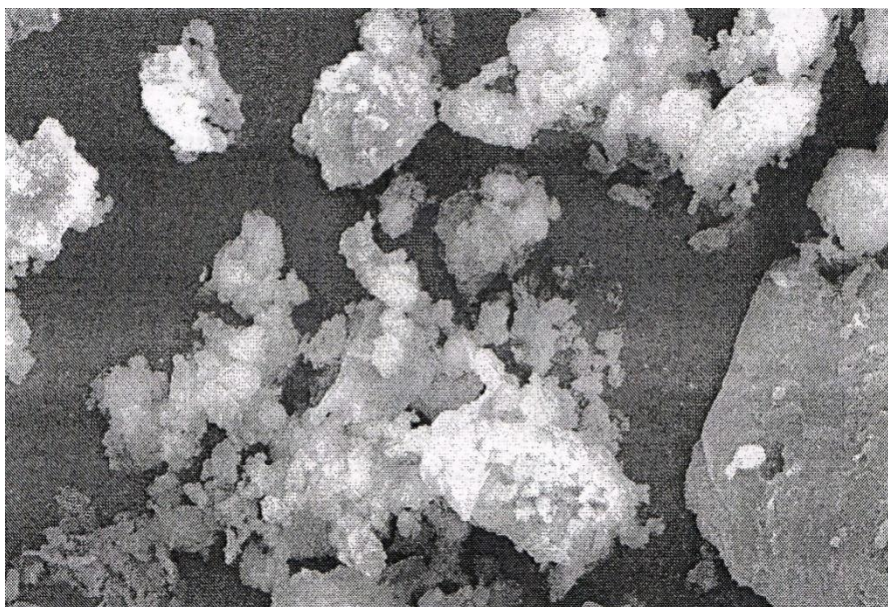


รูปที่ 2.4 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal (ปริชญ์ญา, 2547)

### 3. การเผาความร้อนต่ำ

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



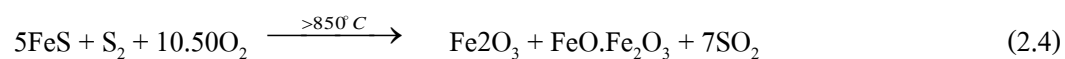


รูปที่ 2.5 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed (ปริชญ์, 2547)

ในกระบวนการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆดังที่กล่าวมาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผาดังต่อไปนี้

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz) เคอลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และ แคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) มาเคไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแมกเนไทต์ ( $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของเถ้าถ่านหินดังสมการ

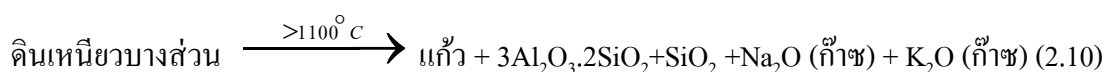
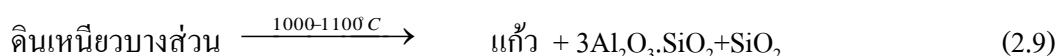


2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) ดังสมการ





3. ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (mullite,  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) และ ควอร์ตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) ในรูปของผลึกของคริสโตบาไลต์ (cristobalite) ดังสมการ



4. ควอร์ตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้วดังสมการ



จะเห็นได้ว่าถ้าถ่านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาระบบนี้ ถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้ถ่านหินมีปริมาณ  $\text{CaO}$  และ  $\text{CaSO}_4$  สูงได้

ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้ถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไตต์ แมกเนไตต์ มุลไลต์ และควอร์ตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย ถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นถ่านหินกลวง (Cenosphere)

### 2.2.3 ชนิดของเถ้านหิน (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

เถ้านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาเถ้านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้านหินที่ได้จากการเผาเถ้านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มาจากรังดินเหนียว และควอร์ตซ์ เถ้านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีรังดินเหนียวสูงจึงให้เถ้านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้านหินที่ได้จากการเผาเถ้านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มาจากรังดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ต่ำทำให้เถ้านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ต่ำด้วย

เถ้านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เถ้านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10

### 2.2.4 รูปร่างและลักษณะของเถ้านหิน

เมื่อเถ้านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ เถ้านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) เถ้านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกัน ของเถ้านหินขนาดเล็กทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

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

เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนเถ้าถ่านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหิน จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

#### 2.2.5 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอนโดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน เถ้าถ่านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.<sup>2</sup>/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer -Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.<sup>2</sup>/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.<sup>2</sup>/ก.

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

#### 2.2.6 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถ้าถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 เถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็กและ

แคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด ถัดถ่านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าถ่านหินละเอียด

## 2.2.7 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมินัมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 4 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิสภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุผลนี้ ASTM C618 จึงได้แยกประเภทของถ่านหินไว้ 2 ชนิด คือ Class C และ Class F โดย Class F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และ Class C จะมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าว ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ), โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของถ่านหิน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

คุณสมบัติ	ASTM C 618 (%)	
	Class F	Class C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ )	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นมากที่สุด	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของ $\text{Na}_2\text{O}$ มากที่สุด	1.5	1.5

2.2.8 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน (Pozzolanic Reaction) (ปริยญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

ความสามารถของเถ้าถ่านหิน ในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหิน คือ เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่า เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดน้อยกว่า และในทำนองเดียวกันเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนต่ำก็ จะมีการพัฒนากำลังได้ไวเช่นกัน ความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

$$\text{Strength Activity Index with Portland Cement} = \left[ \frac{A}{B} \right] \times 100 \quad (2.12)$$

โดย A = กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20

B = กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน

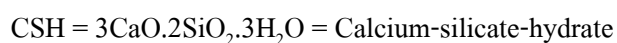
ASTM C168 ได้กำหนดว่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน กระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Cement Gel) และในขณะเดียวกันนี้จะเกิดสารประกอบขึ้นมา 2 ชนิด คือ C-S-H และ  $\text{Ca(OH)}_2$  หลังจากนั้น  $\text{Ca(OH)}_2$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินให้สารประกอบมีคุณสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์ มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตจะดีขึ้นตามไปด้วย

## ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยา Silicate Hydration



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก



## 2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide (NaOH))

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือ โซดาไฟ (Caustic soda) เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ที่ละลายได้ในน้ำ ประกอบด้วยโลหะโซเดียม และเบสไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นของแข็ง (ในรูปแบบผง เกล็ด เป็นแท่งหรือ เม็ดกลม) สีขาว ไม่มีกลิ่น ดูดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 318 องศาเซลเซียส ผลิตได้จากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของน้ำเกลือ และเป็นสารเคมีที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ สบู่และผลิตภัณฑ์ซักฟอก เคมีภัณฑ์ทำความสะอาด โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมโลหะ อาหาร เส้นใยเรยอน สิ่งทอ ใช้ในการฟอกย้อม ล้างสีไหม และช่างเจียรระโนพลอยก็ใช้ในขั้นตอนล้างเม็ดพลอยที่เจียรระโนเสร็จแล้ว นอกจากนั้นยังใช้ปรับสภาพน้ำทิ้งที่มีฤทธิ์เป็นกรด ให้เป็นกลางก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย

โซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ที่พบได้บ่อยจะทำเป็นเม็ด หรือทำเป็นสารละลายอิมัลชันที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โซเดียมไฮดรอกไซด์นี้ดูดความชื้นได้ดีมาก หากนำออกมาจากภาชนะบรรจุแล้วตั้งทิ้งไว้สักครู่มันจะดูดความชื้นจากอากาศ จากสภาพที่เป็นเม็ดแข็ง จะเริ่มเหลว เนื้อสารจะน้อยลง เพราะถูกเจือจางด้วยความชื้นนั่นเอง จึงควรเก็บ โซเดียมไฮดรอกไซด์ไว้ในขวดที่มีฝาปิดสนิท เมื่อเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ให้เป็นสารละลายโดยการละลายน้ำ จะให้ความร้อนออกมาจึงต้องระมัดระวัง หากเตรียมความเข้มข้นสูงๆห้ามเตรียมในภาชนะพลาสติกเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการละลายด้วยน้ำ จะทำให้พลาสติกละลายได้ความสามารถในการละลายของโซดาไฟ จะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้วได้อีกนอกจากน้ำ เช่น เอทานอล และเมทานอล ไม่สามารถละลายได้ใน อีเทอร์ หรือตัวทำละลายอื่นที่ไม่มีขั้ว

โซเดียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติเป็นสารไอออนิก ประกอบด้วย  $\text{Na}^+$  (sodium cation) และ  $\text{OH}^-$  (hydroxide anion) โดย  $\text{OH}^-$  จะทำให้มีคุณสมบัติเป็นเบสแก่ เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเกลือ และน้ำ เอนทัลปีของการละลาย  $\Delta H^\circ$  หรือความร้อนที่ได้จากการละลายมีค่าเท่ากับ  $-44.45 \text{ kJ/mol}$

เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนรุนแรง การหายใจเข้าไป สูดดมฝุ่นควันของสาร จะก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำให้เกิดการทำลายต่อทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้เกิดอาการจาม ปวดคอ หรือน้ำมูกไหล ปวดอักเสบอย่างรุนแรง หายใจติดขัด อาจเกิดปอดอักเสบ น้ำท่วมปอดได้ การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้ และเกิดเป็นแผลพุพองได้ การกลืนหรือกินเข้าไป ทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ กระเพาะอาหาร ทำให้เป็นแผลเป็น เลือดออกในกระเพาะอาหาร อาเจียน ท้องร่วง ความดันเลือดลดต่ำลง อาจทำให้เสียชีวิต ผู้ที่เคยได้รับสารเข้าไปทางปาก อาจมีการพัฒนา

กลายเป็นมะเร็งในภายหลัง 12 ถึง 42 ปี หลังจากกินเข้าไป การสัมผัสถูกตา จะมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลสดใหม่ อาจทำให้มองไม่เห็นถึงขั้นตาบอด

การปฐมพยาบาลเบื้องต้น ถ้าหายใจเข้าไปให้รีบย้ายผู้ป่วยออกมาให้ได้รับอากาศบริสุทธิ์แล้วนำส่งแพทย์ หากเข้าตารีบล้างตาด้วยน้ำอุ่น โดยค่อยๆ ให้น้ำไหลผ่านตา 30 นาที เปิดเปลือกตาไว้ อย่าให้น้ำล้างตาไหลเข้าตาข้างที่ไม่เป็นอะไร เมื่อถูกผิวหนังให้รีบล้างออกโดยให้น้ำไหลผ่านบริเวณที่ถูกสารอย่างน้อย 30 นาที พร้อมกับถอดชุดอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นสารออกแล้วรีบนำส่งแพทย์

ถึงแม้ว่าโซดาไฟเป็นสารไม่ติดไฟ แต่ถ้าสัมผัสกับสารบางชนิด เช่นกรดเข้มข้น หรือทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีจนเกิดความร้อนพอเพียงและทำให้สารที่วางอยู่ใกล้ลุกติดไฟได้ การดับเพลิงจึงต้องดูสารที่เป็นคู่ปฏิกิริยาและใช้เครื่องดับเพลิงให้ถูกต้อง การเก็บ ดูแลรักษา และใช้งานควรอยู่ในภาชนะที่กันน้ำปิดสนิทมิดชิดในที่เย็น หลีกเลี่ยงการสัมผัสโดยตรง ควรจัดให้มีอุปกรณ์ป้องกัน เช่น หน้ากาก แวนนิรภัย ถุงมือ ชุดคลุมทั้งตัว รองเท้าบูต และจัดให้มีฝักบัวล้างตาหรือล้างตัวอยู่ใกล้เคียงบริเวณที่ทำงาน

## 2.4 โซเดียมซิลิเกต ( Sodium Silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) )

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) หรือที่รู้จักกันในชื่อ "น้ำแก้ว หรือ น้ำกาวย" เป็นสารประกอบไปด้วย โซเดียมออกไซด์, ซิลิกา และน้ำ ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และสารเคมีตัวนี้เป็นน้ำยาบ่มคอนกรีตชนิด โซเดียม ซิลิเกต สามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีตและปูนฉาบได้เป็นอย่างดี หน้าที่ถูกกำหนดให้มาทำปฏิกิริยากับหินปูน ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮโดรชันอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งขึ้น ลดรูพรุนที่เกิดจากน้ำในคอนกรีตที่ระเหยออกมาได้

### 2.4.1 กระบวนการผลิต โซเดียมซิลิเกต

เริ่มจากการนำเอาโซดาแอสกับซิลิกามาหลอมให้เป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวเป็นก้อนแก้วแล้วนำไปเข้า เครื่องบดอัตโนมัติ เพื่อละลายอีกครั้งให้กลายเป็นน้ำแก้ว สัดส่วนของโซเดียม กับซิลิกาจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติของ โซเดียมซิลิเกต ถ้าทำให้สัดส่วนใกล้เคียงกันมากเราจะได้เป็นผลึกของของแข็งที่เรียกว่าโซเดียมเมตาซิลิเกต

### 2.4.2 ประโยชน์ของโซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกตมีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมก่อสร้าง และกำลังมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อมและทำให้เกิดโครงสร้างของพวก จีโอพอลิเมอร์ที่ไม่จำเป็นต้องเผาสูงเหมือนการผลิตเซรามิก สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกถือว่าเป็นสัดส่วนที่น้อยมากๆเมื่อเทียบกับการใช้งานใน

อุตสาหกรรมอื่นๆ เราเอาไว้ใช้สำหรับเป็นตัวช่วยกระจายลอยตัว เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการก่ออิฐเตา เป็นเคลือบสีสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความมันแบบไม่มากนัก เป็นแคปปิดผิวงานๆ

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อที่จะลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่ ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ โดยศึกษาอุณหภูมิที่ใช้บ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อให้สามารถเร่งปฏิกิริยาพอลิคอนเด้นเซชัน ให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีกำลังอัดสูงขึ้นในช่วงอายุต้นๆ ซึ่งเป็นการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มเพื่อเป็นฐานข้อมูล ให้สามารถพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ได้อย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น การศึกษาที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ แต่งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้บ่มวัสดุพอลิเมอร์หลายค่า โดยเฉพาะที่เป็นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่อนข้างน้อย

เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ และคณะ (2551) ได้ทำการวิจัยศึกษาจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{OSiO}_2$ : NaOH) โดยน้ำหนักต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึง ผลกระทบอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ด้วย โดยตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ได้หล่อขึ้นเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วันผลการศึกษาพบว่า การใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นค่าอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 40:60 ให้กำลังอัดของเพสต์สูงที่สุด โดยที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 510 กก/ซม<sup>2</sup> ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เมื่อมีอายุหลังจาก 28 วัน โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้การพัฒนา กำลังอัดในช่วงอายุปลายดีขึ้น และการบ่มจีโอพอลิเมอร์เพสต์ด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาช่วงต้น

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ วรเชษฐ ป้อมเชิงพิณ (2552) ได้ศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำเป็นส่วนผสม โดยหล่อเป็นตัวอย่างขนาด 10 x 10 x 10 ซม.<sup>3</sup> ซึ่งกำหนดอัตราส่วนทางเคมีต่างกัน 7 ส่วนผสม แบ่งอุณหภูมิบ่มเป็น 2 ชุด บ่มอุณหภูมิห้อง และบ่มอุณหภูมิ 60°C ทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการรับกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อ



วัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 161 กก./ซม.<sup>2</sup> และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 329 กก./ซม.<sup>2</sup> จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้านหินลงก็จะได้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

วิเชียร ชาลี และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้ทำการทดสอบกำลังอัดหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% เป็นเวลา 90 วัน นอกจากนี้ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมง ได้ทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา Si-O (stretching) โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) ที่ช่วงความถี่ 1200-950 cm<sup>-1</sup> และโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 350 กก./ซม.<sup>2</sup> และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ค่อนข้างชัดเจน

Smith Songpiriyakij และคณะ (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังอัดและระดับปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่า เถ้านหินเปลือกไม้สามารถให้ ซิลิกาที่ดีในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ Si/Al ที่มีค่าสูง โดยใช้ร่วมกับเถ้านหิน และค่า Si/Al ที่ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุดคือ 8 (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 15.9) นอกจากนี้พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อ Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> และ Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าสูงขึ้น

ชรินทร์ เสนาวงษ์ และคณะ (2553) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูง

ช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังอัดเหนียวระหว่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม (2555) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $Na_2SiO_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลุ่มแรกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 กลุ่มที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, และ 2.8 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

กนกเนตรและคณะ (2557) ได้ศึกษาผลของขนาดมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัด และการซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากโซเดียมซิลิเกต ( $Na_2SiO_3$ ) 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) หล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนทรงลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม.<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในอากาศ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงขึ้นและลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ การซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NaOH ลดลง นอกจากนี้พบว่า การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กกลง ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นและการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนลดลง

ในส่วนของสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมจริง W. Chalee and P. Chindaprasirt (2014) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อ กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลใน

สภาวะเปียกสลับแห้ง เป็นเวลา 3 ปี ซึ่งพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ตลอดจนส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมา เป็นการศึกษาผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ในหลายๆ ปัจจัย เช่น ปริมาณของวัสดุประสาน ชนิดของวัสดุประสาน ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ ) และอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสม เป็นต้น โดยในการศึกษาที่ผ่านมาได้เน้นการบ่มที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 60 °ซ ที่ไม่ได้แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มต่อจีโอพอลิเมอร์เพศ์เป็นหลัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะศึกษาผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิที่บ่มหลายค่าควบคู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1.  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$  : สารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยน้ำหนักความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$
2.  $\text{NaOH}$  : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด
3. แก้วถ่านหิน : จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23
4. ทราย : ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียดขนาด 4.75 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59
5. น้ำ : ใช้น้ำสะอาดในการทดลอง

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมมอร์ต้าร์ ( รูปที่ 3.1 (ก) )
3. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ( ในรูปที่ 3.1 (ข) )
4. เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression machine) ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE ( รูปที่ 3.1 (ค) )
5. แบบหล่อปริมาตรทรงลูกบาศก์แบบเหล็ก สำหรับทดสอบกำลังอัดขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มม.<sup>3</sup> (รูปที่ 3.1 (ง) )
6. ตะแกรงเบอร์ 4 (รูปที่ 3.1 (จ) )
7. เกรียง (รูปที่ 3.1(ฉ) )
8. ถังมือยาง (รูปที่ 3.1 (ซ) )
9. แผ่นพลาสติกสำหรับบ่ม (รูปที่ 3.1 (ช) )
10. บีกเกอร์ หลอดทดลอง (รูปที่ 3.1(ฌ) )



(ก) เครื่องผสมมอร์ต้าร์



(ข) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง



(ค) เครื่องทดสอบกำลังอัด



(ง) หล่อปริมาตรทรงลูกบาศก์แบบเหล็ก



(จ) ตะแกรงเบอร์ 4 สำหรับร่อนทราย



(ฉ) เครื่องสำหรับคลุกผสม



(ข) ถุงมือยาง



(ค) พลาสติกห่อสำหรับป่ม



(ง) บีกเกอร์

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

### 3.3 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

เตรียมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ, โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ซึ่งกำหนดอัตราส่วน โดยโมลลาร์ของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  คงที่ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลลาร์ และใช้ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เป็นมวลรวม โดยใช้อัตราส่วน เถ้าถ่านหิน:ทราย เท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนักและใช้ปริมาณของเหลวที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ตามมาตรฐาน ASTM C 230 โดยหล่อมอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม.<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัด และแบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อบ่มที่ อุณหภูมิห้อง, 30, 65 และ 90 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มในอากาศต่อเนื่องโดยใช้พลาสติกใสพันรอบจนถึงอายุทดสอบกำลังอัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลาย

##### 1) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลลาร์

##### 2) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 โมลลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 480.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลลาร์

##### 3) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 14 โมลลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 560.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลลาร์

##### 4) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 16 โมลลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 640.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 16 โมลลาร์

##### 5) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 720.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 โมลลาร์

### 3.3.2 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดลอง

ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งหมด โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับ สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเถ้าถ่านหิน และมวลรวมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังนั้นการทำจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 5 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ลำดับที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ (กรัม)			
		เถ้าถ่านหิน	ทราย	NaOH	Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>3</sub>
1	10-M	772	2123	168	334
2	12-M	772	2123	168	334
3	14-M	772	2123	168	334
4	16-M	772	2123	168	334
5	18-M	772	2123	168	334

- การใช้สัญลักษณ์ในงานวิจัยนี้

ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

FA	หมายถึง	เถ้าถ่านหิน
NaOH	หมายถึง	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>3</sub>	หมายถึง	สารละลายโซเดียมซิลิเกต

### 3.3.3 การผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

- 1) เตรียมเถ้าถ่านหินแม่เมะหนัก 772 กรัม และเตรียมทรายมาตรฐานหนัก 2,123 กรัม ( รูปที่ 3.2 (ก) และ 3.2 (ข) )
- 2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 10 โมลาร์หนัก 168 กรัม และสารละลายโซเดียมซิลิเกตหนัก 334 กรัม ( รูปที่ 3.2 (ค) และ 3.2 (ง) ตามลำดับ )



- 3) นำทรายและเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ที่เตรียมไว้มาใส่ในถาดผสมไม่ชื้นน้ำ ทำการผสมแห้งด้วยเกรียงให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ( รูปที่ 3.2 (จ) และ (ข) ) และ ทำเป็นหลุมกลางกองเป็นรูปปล่องภูเขาไฟ ( รูปที่ 3.2 (ซ) )
- 4) นำสารละลายที่เตรียมไว้เทลงในหลุม ( รูปที่ 3.2 (ซ) ) ใช้เกรียงตักส่วนผสมด้านนอกใส่หลุม คลุกส่วนผสมให้เข้ากัน โดยใช้เกรียงนวดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ( รูปที่ 3.2 (ฅ) )
- 5) นำส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเข้าแบบหล่อตัวอย่าง ( รูปที่ 3.2 (ฎ) )
- 6) ทำการผสมตามข้อ 1-5 อีก 4 ครั้ง โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์



(ก) การเตรียมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ



(ข) การเตรียมทราย



(ค) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



(ง) การเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต



(จ) ทรายและเถ้าถ่านหินกองรวมกันในถาด



(ข) ผสมทรายและเถ้าถ่านหินให้เป็นเนื้อเดียวกัน



(ค) ทำหลุมเป็นรูปปล่องภูเขาไฟ



(ค) เทสารละลายที่เตรียมไว้ลงในหลุม



(ง) คลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน



(จ) นำจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าที่ผสมเสร็จแล้วเข้าแบบหล่อ

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

### 3.3.4 การหล่อแบบตัวอย่าง

1. ทำความสะอาดแบบหล่อ และทาน้ำมันบางๆ ไว้ให้เรียบร้อยก่อนการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ( รูปที่ 3.3 (ก) )
2. การหล่อแบบตัวอย่างทดสอบ จะต้องทำให้เสร็จภายใน 2 ½ นาที หลังจากผสมมอร์ตาร์เสร็จ เรียบร้อยแล้ว
3. ใส่จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แบบหล่อทุกช่องหนาประมาณ 25 มม. ( รูปที่ 3.3(ข) ) กระทุ้งด้วยแท่ง กระทุ้ง 32 ครั้ง ภายใน 10 วินาที โคนกระทุ้งเป็น 4 รอบ แต่ละรอบกระทุ้งให้ตั้งฉากไปทั่วแบบหล่อ เมื่อกระทุ้งครบ 4 รอบ แล้วให้กระทุ้งช่องต่อไปจนครบ ( รูปที่ 3.3 (ค) )
4. ใส่จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เหลือในช่องแบบหล่อทุกช่องให้สูงสูงกว่าขอบ และกระทุ้งเช่นเดียวกับ ชั้นแรก เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วมอร์ตาร์ควรสูงกว่าขอบเล็กน้อย
5. ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ที่สันติดขอบแบบลงมาในแบบ แล้วปาดตกแต่งผิวมอร์ตาร์ให้เรียบ (รูปที่ 3.3 (ง) )
6. หลังจากเทมอร์ตาร์ลงหล่อแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้นำไปเก็บไว้ในห้องบ่มชื้น หรือใช้ผ้าชุบน้ำคลุมไว้จนครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 30, 65 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นบ่มด้วยการห่อพลาสติกใสในอากาศ ( รูปที่ 3.3 (จ) )
7. นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ตามระยะเวลาที่ 7, 14 และ 28 วัน



(ก) ทาน้ำมันบางๆ ที่แบบหล่อ



(ข) ใส่จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในแบบหล่อทุกช่อง



(ค) กระทบโดยใช้แท่งกระทบในแบบหล่อ



(ง) ปาดหน้าแบบหล่อให้เรียบโดยใช้เกรียง





(จ) บ่มด้วยการห่อพลาสติกใส

### รูปที่ 3.3 การหล่อตัวอย่างทดสอบ

#### 3.3.5 การทดสอบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ หล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม.<sup>3</sup> ตาม ASTM C 109 โดยใช้ปริมาณของเหลวที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ซึ่งวิธีการผสมมอร์ตาร์เป็นไปตาม ASTM C 305 ทำการถอดแบบหลังหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง และแบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อบ่มที่ อุณหภูมิห้อง, 30, 65 และ 90 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มในอากาศต่อเนื่องโดยใช้พลาสติกใสพันรอบจนถึงอายุทดสอบกำลังอัด โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน

## บทที่ 4

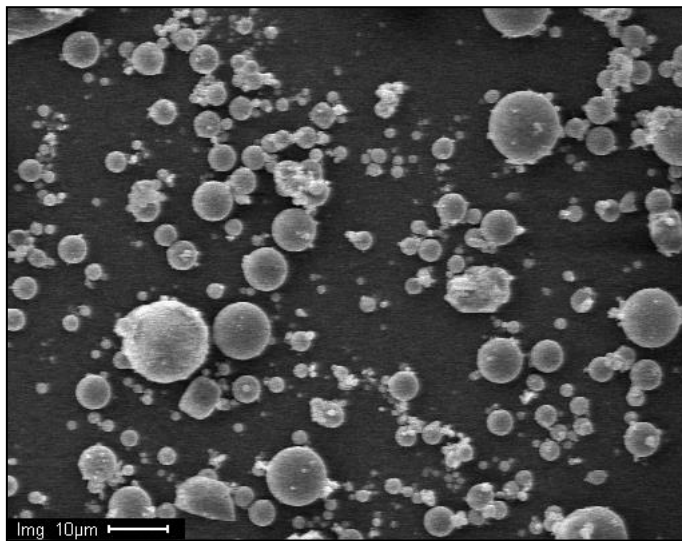
### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 สมบัติของวัสดุประสาน

##### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน

##### 4.1.1.1 รูปร่าง

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



รูปที่ 4.1 รูปขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

##### 4.1.1.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียด

วัสดุประสานได้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 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 มีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรท์เซชัน ในจีโอพอลิเมอร์

#### 4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหิน ที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 70.91 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, $\text{SiO}_2$	34.10
Aluminum Oxide, $\text{Al}_2\text{O}_3$	19.90
Iron Oxide, $\text{Fe}_2\text{O}_3$	16.91
Calcium Oxide, CaO	18.75
Magnesium Oxide, MgO	-
Sodium Oxide, $\text{Na}_2\text{O}$	0.69
Potassium Oxide, $\text{K}_2\text{O}$	2.38
Sulfur Trioxide, $\text{SO}_3$	2.21
Loss On Ignition, LOI	0.11

#### 4.1.3 สมบัติของมวลรวมและสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งอัตราส่วน  $\text{SiO}_2$  ต่อ  $\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$  สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่น, ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C128-88 แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมละเอียดในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.61, การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.48 และความหนาแน่น เท่ากับ  $1691 \text{ กก/ม}^3$  ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของมวลรวมละเอียดที่ผสมคอนกรีตโดยทั่วไป

ตารางที่ 4.2 สมบัติของมวลรวม

การทดสอบ	มวลรวมละเอียด
ความหนาแน่น ( $\text{กก/ม}^3$ )	1691
ความถ่วงจำเพาะรวม (SSD)	2.60
การดูดซึมน้ำ (%)	0.48
โมดูลัสความละเอียด	2.73

#### 4.2 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

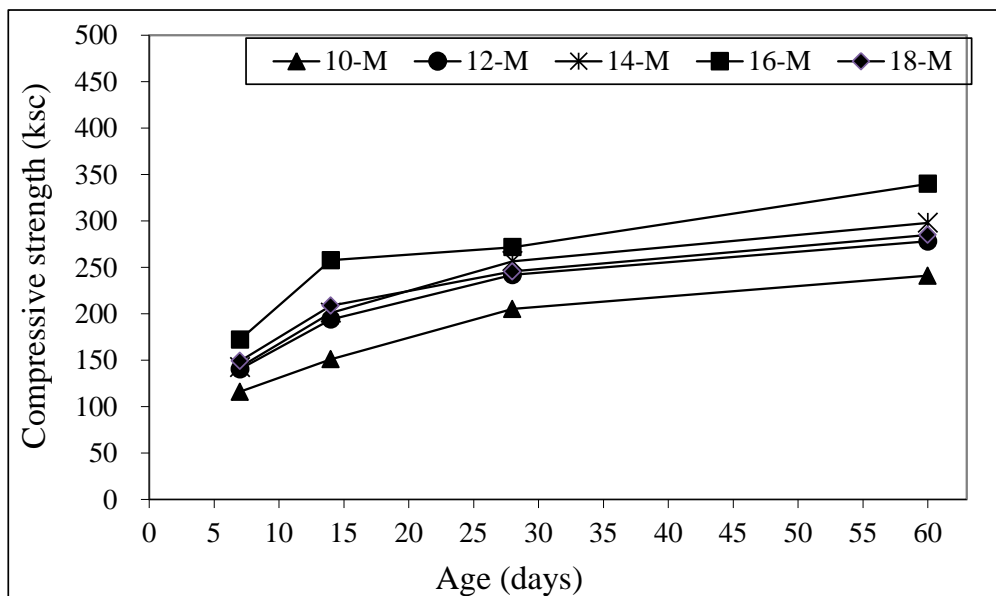
ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน แสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน (ตารางที่ 4.3) ของกลุ่มที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้องที่มีความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน เท่ากับ 177 173 180 158 และ 165 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  สูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินออกมาได้มาก และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี จึงมีกำลังอัดในช่วงต้น (7 วัน) สูง (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) จึงมีผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน ต่ำลงได้



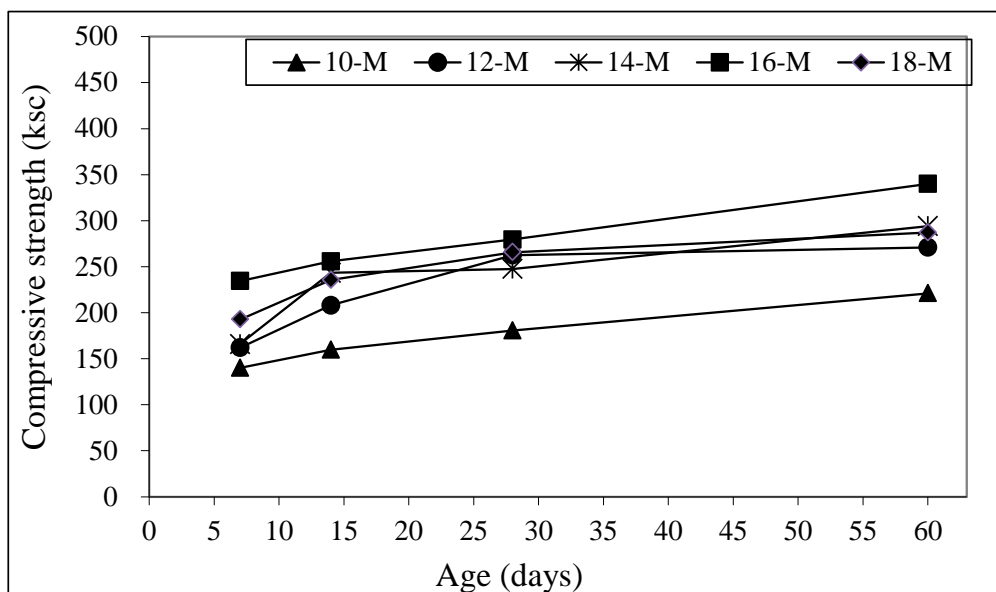
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและเร่งให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์รับแรงได้ดีขึ้นในช่วงต้น โดยสังเกตได้จากกำลังอัดที่อายุ 7 วันของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ก่อนข้างชัดเจน การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เป็นการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหิน ทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น เพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต ทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุที่บ่ม (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009 ; ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาติ, 2554)

**ตารางที่ 3** กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

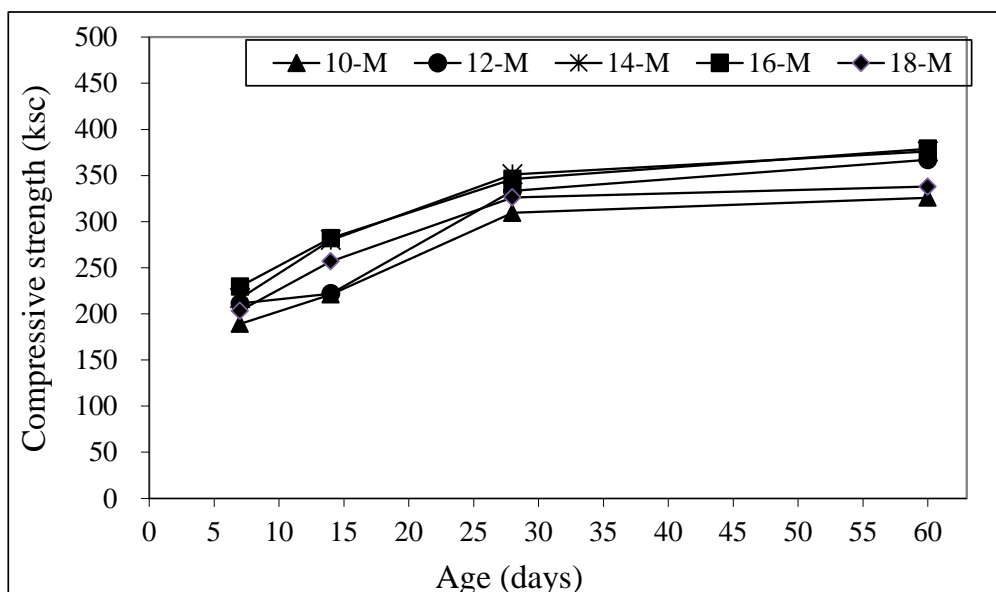
ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )																ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง				บ่มที่อุณหภูมิ 30 °ซ				บ่มที่อุณหภูมิ 65 °ซ				บ่มที่อุณหภูมิ 90 °ซ				อุณหภูมิห้อง	30 °ซ	65 °ซ	90 °ซ
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน				
10-M	116	151	205	241	140	160	181	221	189	221	310	326	113	132	170	225	177	129	164	150
12-M	140	194	242	278	162	208	263	271	211	222	333	367	117	124	189	245	173	162	144	162
14-M	143	201	257	298	166	243	248	294	217	280	351	376	137	159	172	249	180	149	166	126
16-M	172	258	272	340	234	256	280	340	230	282	346	379	149	172	234	267	158	120	150	157
18-M	149	209	246	285	193	236	266	287	203	257	326	338	164	169	199	214	165	138	170	121



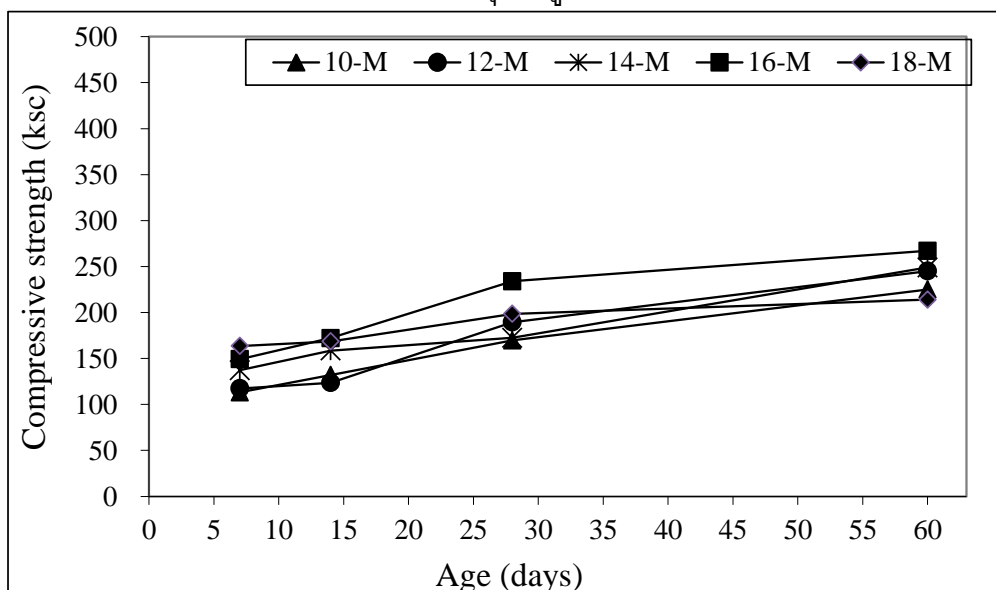
ก) ปมที่อุณหภูมิห้อง



ข) ปมที่อุณหภูมิ 30 °ซ



ค) ปมที่อุณหภูมิ 65 °ซ



ง) ปมที่อุณหภูมิ 90 °ซ

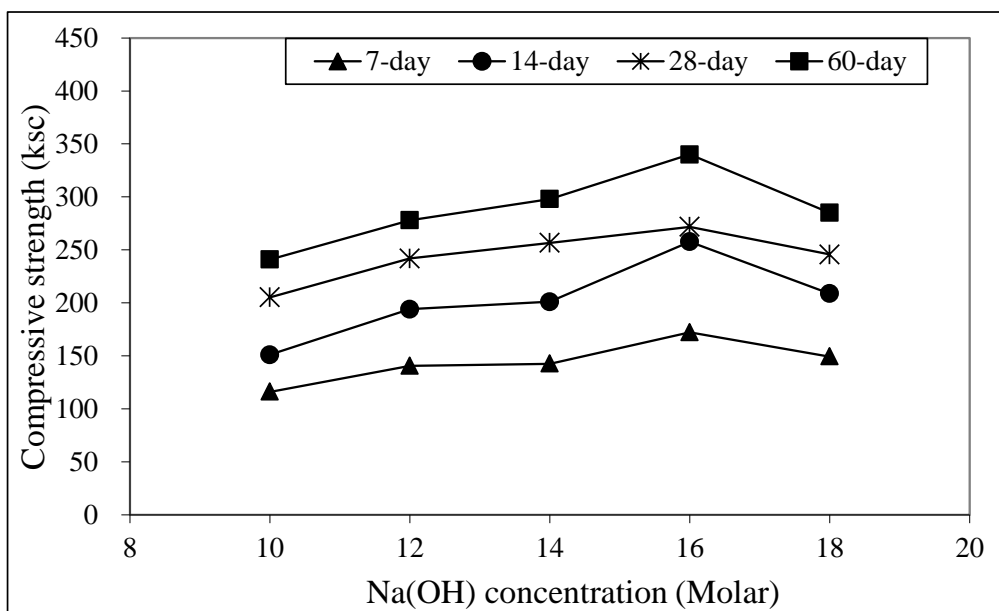
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุทดสอบของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน

#### 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

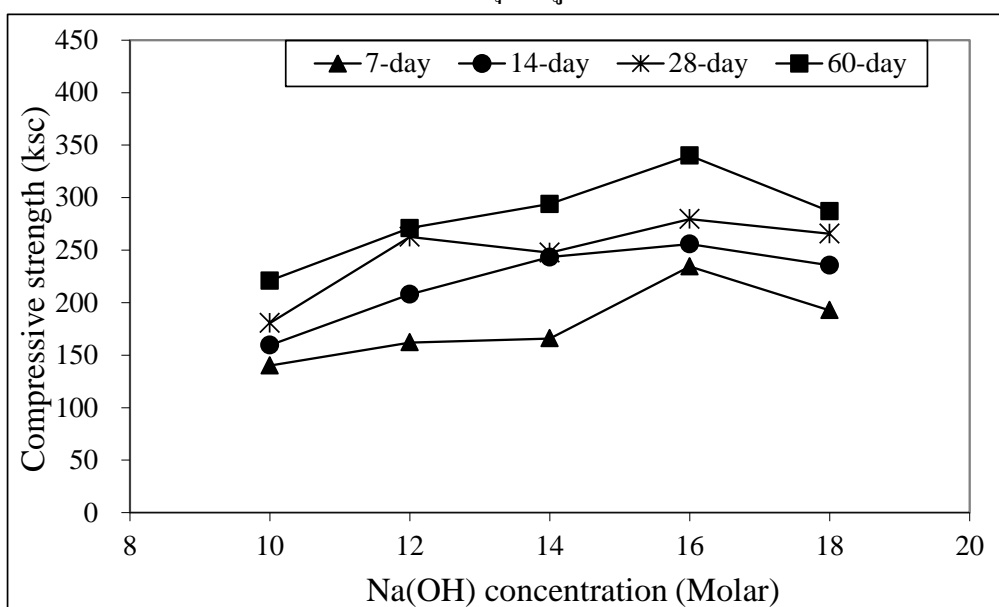
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ปมที่อุณหภูมิห้อง 30 °ซ 65 °ซ และ 90 °ซ ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ก) 4.3(ข) 4.3(ค) และ 4.3(ง) ตามลำดับ พบว่า ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุการปมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ที่ใช้

สารละลาย NaOH เข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดเท่ากับ 205 242 257 272 และ 246 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจากค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถาถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดและความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ชรินทร์ และ วิเชียร, 2554) ที่พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูง มีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์เป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเถาถ่านหินและค่าที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะออกมา ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ซึ่งเป็นสารที่มีกำลังต่ำและละลายน้ำได้ ส่งผลทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีความทึบน้ำมากขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากจะลดสารประกอบที่ไม่เป็นประโยชน์ลงแล้ว ยังได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย (ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ กลับส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจทำให้สมบัติในการยึดประสานลดลงได้ (Chindaprasirt and Chalee, 2014)

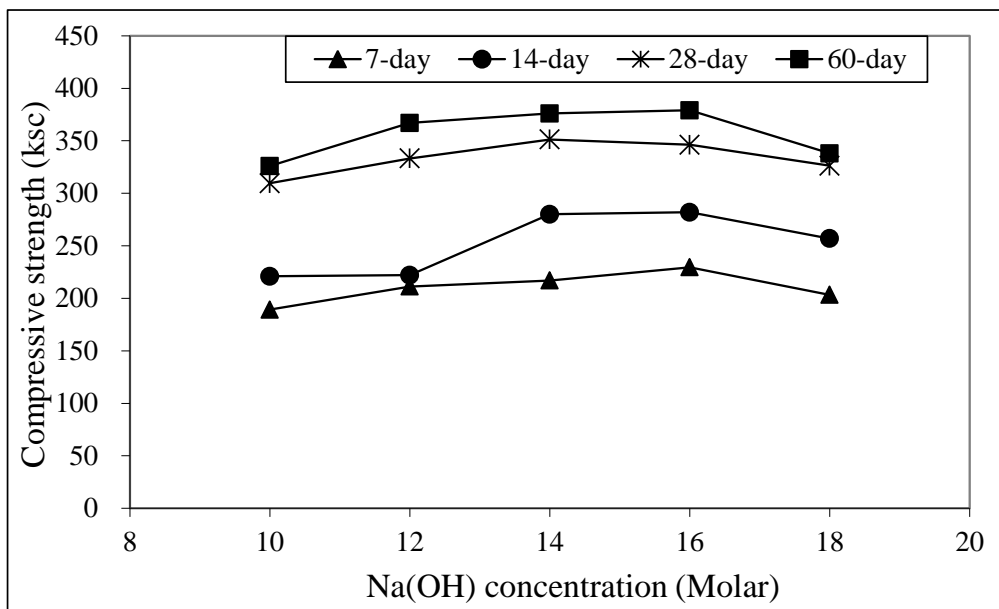
ผลการศึกษานี้เป็นที่น่าสังเกตว่า กำลังอัดช่วงต้น (อายุไม่เกิน 14 วัน) ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ของกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิบ่ม 90 °ซ) และใช้ความเข้มข้นของ NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ มีผลให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นเล็กน้อย เช่น กำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิ 90°ซ ที่ใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ เท่ากับ 113 117 137 149 และ 164 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันที่ทำให้กำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้นได้



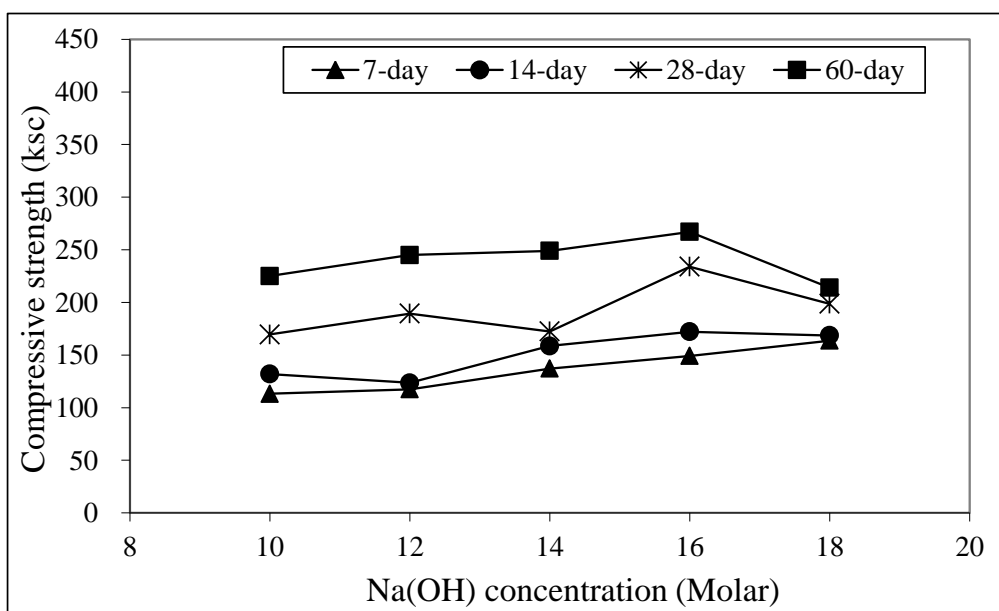
ก) ป๋มที่อุณหภูมิจี๋อง



ข) ป๋มที่อุณหภูมิจี๋ 30 °ซ



ก) บ่มที่อุณหภูมิ 65 °ซ



ง) บ่มที่อุณหภูมิ 90 °ซ

รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) 4.4(ข) 4.4(ค) และ 4.3(ง) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65 °ซ เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 16 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิห้อง 30°ซ 65°ซ และ 90°ซ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 272 280 346 และ 234 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิบ่ม เป็นผลจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่ถูกเร่งให้ทำปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ระหว่างซิลิกาและอลูมินา โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาจำพวกสารอัลคาไลซิลิเกตและความร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการอัดตัวและมีสมบัติเป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังกับมอร์ตาร์ได้ดีขึ้น (Chindaprasirt et al., 2009 ; Bakharev, 2005) อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงถึง 90°ซ กลับมีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ต่ำลง อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นรุนแรงเกินไป ส่งผลให้การแตกร้าวเนื่องจากความร้อน และทำให้กำลังอัดลดลงได้ (Bakharev, 2005)

พิจารณาประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม ที่ 65°ซ ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ตามสมการที่ (4.1)

$$E_T = \frac{[(C_{65} - C_R) \times 100]}{C_R} \quad (4.1)$$

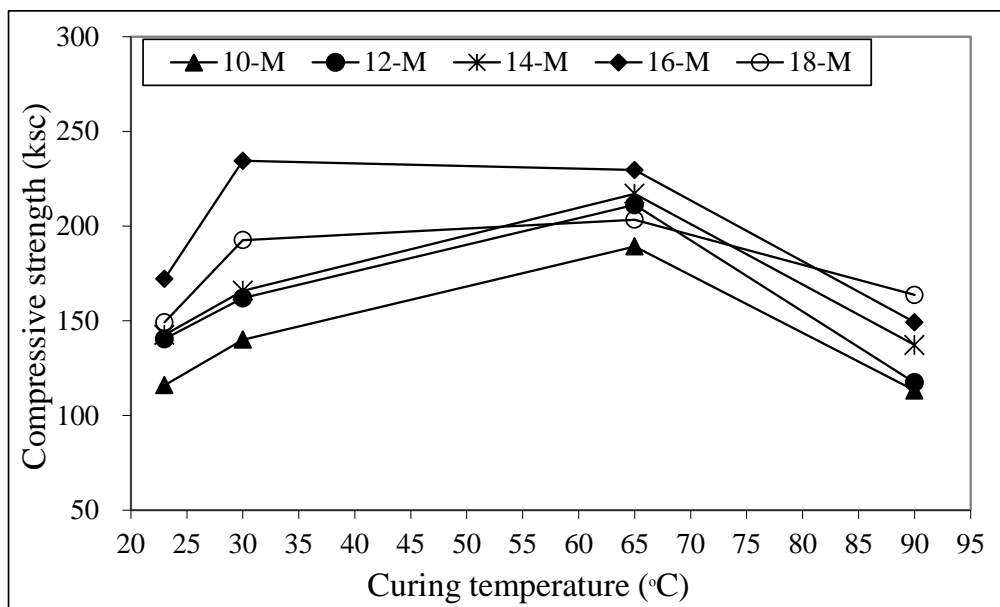
เมื่อ  $E_T$  = ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่ 65°ซ (ร้อยละ)

$C_{65}$  = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิ 65 °ซ (กก/ซม<sup>2</sup>)

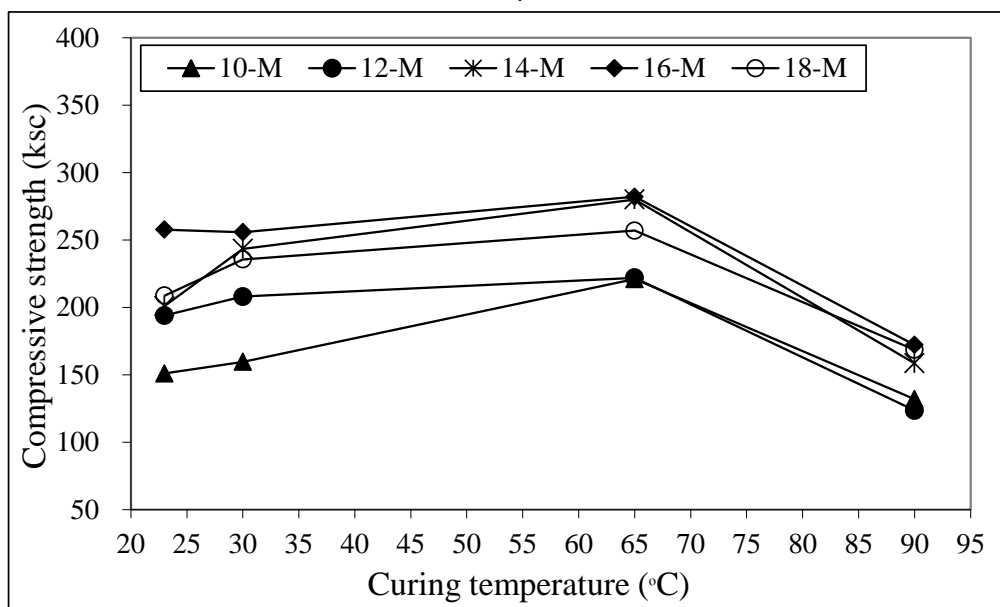
$C_R$  = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (กก/ซม<sup>2</sup>)

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ ในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.5 พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่บ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง โดยเหมือนกันทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่อายุ 28 วัน เท่ากับ ร้อยละ 51 38 37 27 และ 33 ตามลำดับ ผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง ซึ่งน่าจะเกิดจากสารละลาย NaOH ที่มีความ

เข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถาถ่านหินได้มากกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นต่ำ และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ตัวรมีกำลังอัดสูงในอุณหภูมิห้องได้ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Panha Huy และ คณะ, 2559)

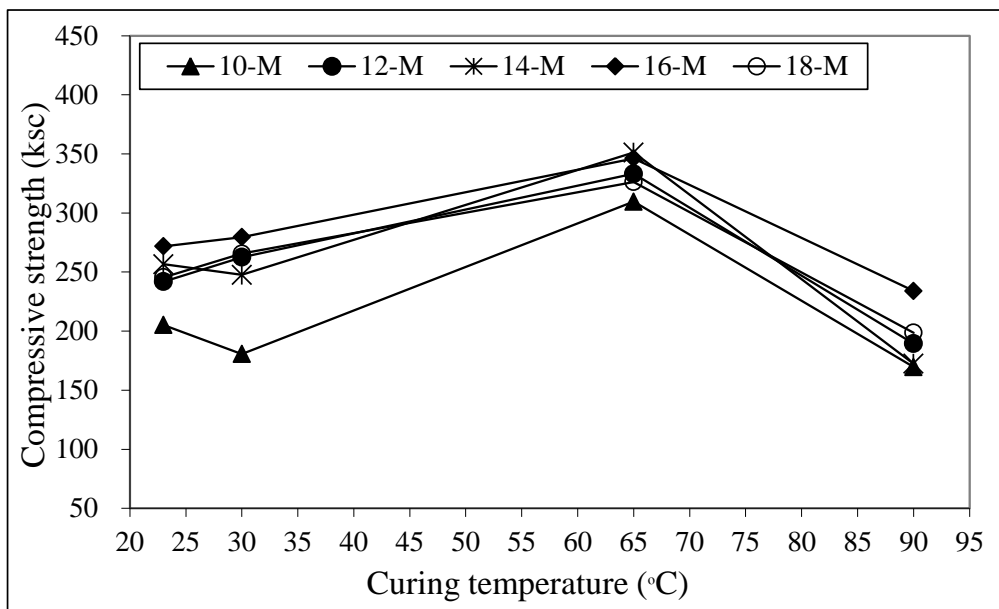


ก) อายุ 7 วัน

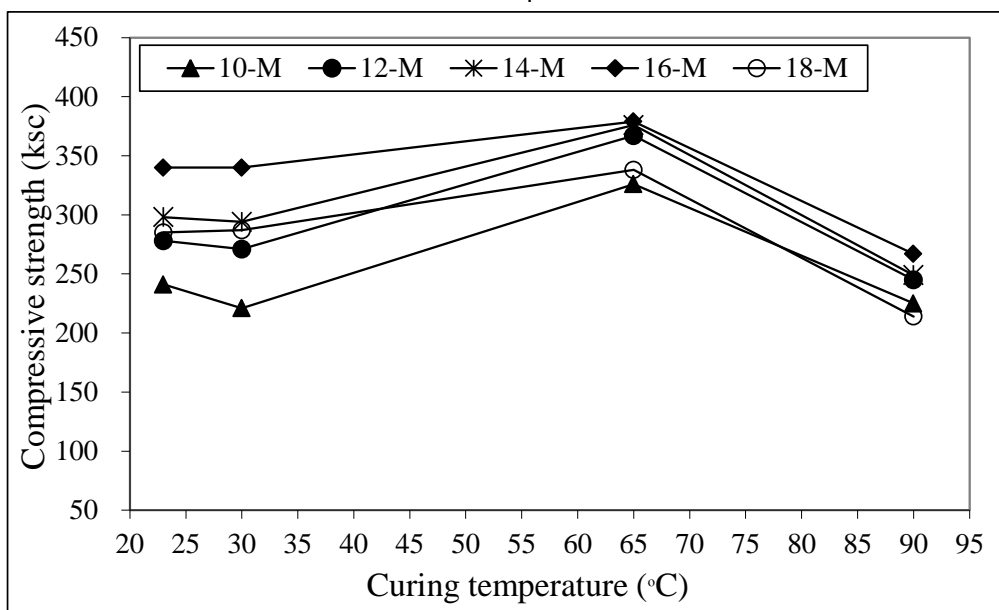


ข) อายุ 14 วัน



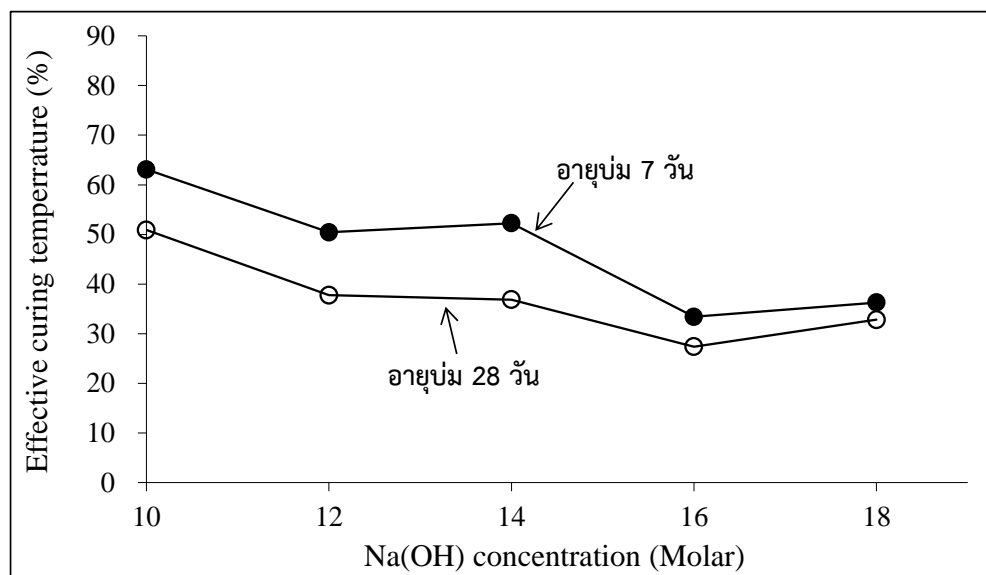


ค) อายุ 28 วัน



ง) อายุ 60 วัน

รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 ความเข้มข้นของ NaOH มากขึ้น ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แสดงในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบกับอายุ 7 วัน มีแนวโน้มลดลง

5.1.2 จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาถ่านหินแม่เมาะมีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์

5.1.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65 °ซ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มสูงถึง 90 °ซ

5.1.4 การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง

5.1.5 การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งาน ได้แก่ จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 14 ถึง 16 โมลาร์ และใช้อุณหภูมิบ่ม 65 °ซ เนื่องจากให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ไปในทิศทางที่ดี

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้บ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น เช่น เถาถ่านหินจากแหล่งอื่นๆที่เผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด เถาถ่านหิน เถาถ่านหินเปลือกไม้ เถาปาล์ม น้ำมัน เถาชานอ้อย และ ดินเหนียวขาว เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายในการใช้วัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- กนกเนตร ชื่นนุกุ่ม วริศรา โกระวิโยชิน และ วิเชียร ชาลี, 2557. ผลของความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พูนจากเถ่าถ่านหิน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 24(1) : 56-65.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุตา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2552. กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 15(1): 13-22.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554. การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(2) : 187-195
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2552. การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. *เอกสารประกอบการบรรยายวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 71-79.
- เชิรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ และสมิตร ส่งพิริยะกิจ, 2551. จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ่าถ่านหินและเถ่าชีวมวล ตอนที่ 1 : ผลกระทบของสัดส่วนผสมต่อกำลังอัด. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 19 ฉบับที่ 2
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต*. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547. *เถ่าถ่านหินในงานคอนกรีต*, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย
- Panha Huy Soklam Mov และ วิเชียร ชาลี, 2559. การผลิตคอนกรีตบดลือค ชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ่าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 21(2), หน้า 31-46
- วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ, 2556. การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ่าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก. *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 36(2), หน้า 197-213
- วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552. การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ่าถ่านหิน. *Burapha Sci.*, J.14 (1) หน้า 47-55
- วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555. การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 35(2), หน้า 157-170

- สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวราเชษฐ ป้อมเชียงพิณ, 2552. จีโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่  
 เมาะ, การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุ  
 รนารี 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1831-1836
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2550. วัสดุจีโพลิเมอร์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
 อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ วิเชียร ชาลี และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549. การศึกษาการชะเถ้าถ่านหิน  
 ลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*,  
 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.*
- ASTM C 305-12 (2016). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes  
 and Mortars of Plastic Consistency, *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02*
- ASTM C 230-08 (2016). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic  
 Cement, *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02*
- ASTM C109 (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement  
 Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *Annual Book of ASTM Standards,  
 Vol. 04.02*
- Bakharev, T., 2005. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated  
 temperature curing. *Cem Concr Res*, Vol. 35, pp.1224-1232.
- Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C. and Chalee, W., 2014. Concrete durability presented by  
 acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results  
 in marine site. *Materials and Structures*, Vol. 47, pp.1501-1511.
- Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C. 2010. Utilization of fly ash concrete in marine  
 environment for long term design life analysis. *Mater Design*, Vol. 3, pp.1242-1249.
- Davidovits, J. 1991, *Geopolymer inorganic polymeric new materials*. *J Therm Anal* 37, pp.  
 1633-1659.
- 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.
- 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.

- 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. *Construction 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.

## ภาคผนวก ก

### ผลผลิต (Output)

#### บทความทางวิชาการระดับชาติ

- 1) ณัฐพัชร ศาติไตรวัฒน์ และ วิเชียร ชาลี. (2559). ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ่าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* (Going on submission)



ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง  
จ.ชลบุรี ๒๐๑๓๑

๒๕ ตุลาคม ๒๕๕๙

เรื่อง ขอส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

เรียน บรรณาธิการวารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

คณะผู้เขียน นางสาวณัฐพัชร์ ผาติไตรวัฒน์ และ รศ.ดร. วิเชียร ชาลี มีความประสงค์ขอส่งบทความวิจัย เรื่อง “ผลของอุณหภูมิป้อนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน” เพื่อเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนา มจร. โดยเสนอรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินบทความจำนวน 3 ท่าน ดังนี้

- ๑) รศ.ดร. สมิตร ส่งพิริยะกิจ (ssy@kmutnb.ac.th)
- ๒) รศ.ดร. สำเร็จ รักซ้อน (sumreng.ruk@rmutr.ac.th)
- ๓) ผศ.ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร (weerachart.tan@kmutt.ac.th)

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชาลี)

ผู้เขียนบทความ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

โทรศัพท์ ๐-๓๘๑๐-๒๒๒๒ ต่อ ๓๓๕๖

โทรสาร ๐-๓๘๑๐-๒๒๒๒ ต่อ ๓๓๕๕



ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน

Effect of temperature curing on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar

ณัฐพัชร์ ผาติไตรวัฒน์<sup>1</sup> และ วิเชียร ชาลี<sup>2\*</sup>

Nutthaphatt Phatitriwatt<sup>1</sup> and Wichian Chalee<sup>2\*</sup>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลของอุณหภูมิบ่มและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมะ โซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ และใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวม หล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ขนาด 50×50×50 มม<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง 30 °ซ 65 °ซ และ 90 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มต่อเนื่องในอากาศจนถึงอายุทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65 °ซ ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มสูงถึง 90 °ซ

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์, เถ้าถ่านหิน, กำลังอัด, อุณหภูมิบ่ม, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

### Abstract

This research aimed to study the effect of temperature curing and sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. The geopolymer mortar was prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide (NaOH) solution. The concentration of NaOH was varied at 10, 12, 14, 16 and 18 molar. River sand was used as an aggregate. The geopolymer mortar cube specimens of  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  were cast for compressive strength test at 7, 14 and 28 days. The samples were air cured at room temperature,  $30^\circ\text{C}$ ,  $65^\circ\text{C}$  and  $90^\circ\text{C}$  for 48 hours and continuous curing in air until the age test. The results showed that the compressive strength of geopolymer mortar increase with the increase in NaOH concentration as high as 16 molar. The increase in temperature curing as high as  $65^\circ\text{C}$  result in increased compressive strength but they were found to decrease when the temperature curing was up to  $90^\circ\text{C}$ .

**Keywords** : Geopolymer mortar, Fly ash, Compressive strength, Temperature curing, NaOH concentration

---

<sup>1</sup>นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>2</sup>รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (wichian@buu.ac.th)

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

## 72 1. บทนำ

73 ปัจจุบันเถาถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจัง โดยมีผลงานวิจัย  
 74 ที่ยืนยันได้ว่า เถาถ่านหินแม่เมาะเป็นเถาถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากมีอนุภาคที่กลมตันและมีความ  
 75 ละเอียด ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นในระยะยาว มีความที่บ้น้ำที่ดี และลดความ  
 76 ร้อนในคอนกรีตหลา [1-3] อย่างไรก็ตาม การใช้เถาถ่านหินในงานคอนกรีตในประเทศไทยยังคงมีการใช้  
 77 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมด้วย เนื่องจากต้องการสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน  
 78 เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับสารประกอบซิลิกาหรืออลูมินาในเถาถ่านหิน แนวคิดในการพัฒนาการใช้งาน  
 79 ของเถาถ่านหินโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นแนวทางที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากจะสามารถลด  
 80 การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนลงได้ ตลอดจนเป็นการสร้างมูลค่าให้กับ  
 81 วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

82 จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ได้จาก  
 83 ซิลิกา (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และวัสดุปอซโซลาน โดยการนำสารละลายแอลคาไลที่มีความ  
 84 เข้มข้นสูงมากระตุ้นวัสดุปอซโซลาน ที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถาถ่านหินหรือเถา  
 85 ชีวมวล หรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติอื่นๆ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยไม่ต้องใช้  
 86 ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม วัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอลูมินากับ  
 87 สารละลายไฮดรอกไซด์และสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน และได้  
 88 สารประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ [4]

89 งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติ  
 90 ด้านความคงทน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลที่สามารถพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้ใช้งานจริงในอนาคตได้ โดย  
 91 การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้ความร้อนในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน จะส่งผลให้กำลังอัด  
 92 ของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นได้ในช่วงระยะต้นๆ [5, 6] ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญในการรับแรงของวัสดุจีโอพอลิ  
 93 เมอร์ อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ก็อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและ  
 94 สูญเสียการรับแรงได้ นอกจากนี้การบ่มจีโอพอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูง อาจทำให้ยากต่อการพัฒนาเพื่อใช้งาน  
 95 ในอุตสาหกรรมจริง รวมทั้งเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นควรมีการศึกษารูปร่างในการบ่มวัสดุจีโอพอลิ  
 96 เมอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถพัฒนาใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ และให้ผลการรับแรงเชิงกลที่สามารถใช้  
 97 งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้  
 98 เถาถ่านหินแม่เมาะ ที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดี มีความเหมาะสมในการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้  
 99 งานในเชิงพาณิชย์มากที่สุดในประเทศไทย โดยการศึกษามุ่งประเด็นที่ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอ  
 100 พอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาถ่านหิน เพื่อให้ได้อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์  
 101 ภายใต้การรับแรงเชิงกลที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างชนิดต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

102

103

104

## 105 2. วิธีการศึกษา

### 106 2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

107 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยเถ้านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรง  
 108 เบอร์ 325 ร้อยละ 32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23  
 109 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินแม่เมาะแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์  
 110 คอนกรีตประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งอัตราส่วน  $\text{SiO}_2$  ต่อ  $\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 3.4 โดย  
 111 น้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$  สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เข้มข้น 10  
 112 12 14 16 และ 18 โมลาร์ มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 และความ  
 113 ถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60

### 114 2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

115 การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และ  
 116 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 12  
 117 14 16 และ 18 โมลาร์ ได้ใช้ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสาน (เถ้านหิน)  
 118 ต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 และใช้อัตราส่วนระหว่างของเหลว (สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลาย  
 119 โซเดียมไฮดรอกไซด์) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาแสดง  
 120 ดังตารางที่ 2 หล่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มม<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน  
 121 ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง  $30^\circ\text{C}$   $65^\circ\text{C}$  และ  $90^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่ม  
 122 ต่อเนื่องในอากาศจนถึงอายุทดสอบ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

## 124 3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

### 125 3.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

126 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้านหิน แสดงดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาการ  
 127 พัฒนากำลังอัดในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน (ตารางที่ 3) ของกลุ่มที่บ่มที่  
 128 อุณหภูมิห้อง พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน  
 129 เทียบกับ 7 วัน มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้องที่มีความเข้มข้นของ  
 130 สารละลาย  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบกับ 7 วัน เท่ากับ  
 131 177 173 180 158 และ 165 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ความเข้มข้นของ  
 132 สารละลาย  $\text{NaOH}$  สูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินออกมาได้มาก และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา  
 133 พอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี จึงมีกำลังอัดในช่วงต้น (7 วัน) สูง [7] จึงมีผลให้ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบกับ 7  
 134 วัน ต่ำลงได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลาย  $\text{NaOH}$  ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์  
 135 ไรเซชันและเร่งให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์รับแรงได้ดีขึ้นในช่วงต้น โดยสังเกตได้จากกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอ  
 136 โอปอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  ก่อนข้างชัดเจน การที่กำลังอัด

137 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน  
 138 ที่เป็นการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของซิลิกาและอลูมินาในเก้าถ่านหิน ทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่าง  
 139 จีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น เพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ใน  
 140 คอนกรีต ทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุที่บ่ม [7, 8]

141

### 142 3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

143 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มที่  
 144 อุณหภูมิห้อง 30 °ซ 65 °ซ และ 90 °ซ ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) 2(ข) 2(ค) และ 2(ง) ตามลำดับ พบว่า ทุก  
 145 ส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ เช่น กำลังอัด  
 146 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 10 12  
 147 14 16 และ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดเท่ากับ 205 242 257 272 และ 246 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจากต่าง  
 148 ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเก้าถ่านหินได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไร  
 149 เซชันได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดและความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าว  
 150 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [8] ที่พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูง มีผลทำให้คุณสมบัติ  
 151 แข็งกลของจีโอพอลิเมอร์เป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น นอกจากนี้อาจมีผลมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผล  
 152 จากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมในเก้าถ่านหินและต่างที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกา  
 153 บางส่วนที่ถูกชะออกมา ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ซึ่งเป็นสารที่มีกำลังต่ำและละลายน้ำได้  
 154 ส่งผลทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีความทึบน้ำมากขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์  
 155 นอกจากจะลดสารประกอบที่ไม่เป็นประโยชน์ลงแล้ว ยังได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเชื่อม  
 156 ประสานและให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย [9] อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 18  
 157 โมลาร์ กลับส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณของ NaOH  
 158 ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ซึ่งอาจ  
 159 ทำให้สมบัติในการยึดประสานลดลงได้ [10]

160 ผลการศึกษาดังนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า กำลังอัดช่วงต้น (อายุไม่เกิน 14 วัน) ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์  
 161 ของกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิบ่ม 90 °ซ) และใช้ความเข้มข้นของ NaOH สูงถึง 18 โมลาร์ มีผลให้  
 162 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นเล็กน้อย เช่น กำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มใน  
 163 อุณหภูมิ 90°ซ ที่ใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ เท่ากับ 113 117 137 149  
 164 และ 164 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน  
 165 ที่ให้กำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้นได้

### 166 3.3 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

167 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า กำลังอัด  
 168 ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65 °ซ เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้  
 169 สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 16 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิห้อง 30°ซ 65°ซ และ 90°ซ มีกำลังอัดที่

170 อายุ 28 วัน เท่ากับ 272 280 346 และ 234 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่ม  
 171 สูงขึ้นตามอุณหภูมิบ่ม เป็นผลจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันถูกเร่งให้ทำปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยา  
 172 พอลิเมอร์ไรเซชันเป็นปฏิกิริยาถูกโคระหว่างซิลิกาและอลูมินา โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาจำพวกสารอัลคาไลซิลิเกต  
 173 และความร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการอัดตัวและมีสมบัติเป็นวัสดุ  
 174 ประสานที่ให้กำลังกับมอร์ตาร์ได้ดีขึ้น [5, 6] อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงถึง  
 175 90°C กลับมีผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ต่ำลง อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้น  
 176 รุนแรงเกินไป ส่งผลให้การแตกร้าวเนื่องจากความร้อน และทำให้กำลังอัดลดลงได้ [6]

177 พิจารณาประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม ที่ 65°C ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ตามสมการที่ (1)

$$178 \quad 179 \quad E_T = \frac{[(C_{65} - C_R) \times 100]}{C_R} \quad (1)$$

180

181 เมื่อ  $E_T$  = ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่ 65°C (ร้อยละ)

182  $C_{65}$  = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิ 65 °C (กก/ซม<sup>2</sup>)

183  $C_R$  = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (กก/ซม<sup>2</sup>)

184

185 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่อุณหภูมิ  
 186 65°C ในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังรูปที่ 4 พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความ  
 187 เข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่บ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง โดยเหมือนกัน  
 188 ทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 12 14  
 189 16 และ 18 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่อายุ 28 วัน เท่ากับ ร้อยละ 51 38 37 27 และ 33  
 190 ตามลำดับ ผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์  
 191 มอร์ตาร์ในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง ซึ่งน่าจะเกิดจากสารละลาย  
 192 NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถาถ่านหินได้มากกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นต่ำ  
 193 และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงในอุณหภูมิห้องได้ โดยผล  
 194 ดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [11]

195

#### 196 4. สรุปผล

197 จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 198 1) ความเข้มข้นของ NaOH มากขึ้น ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แสดงในรูปร้อยละ  
 199 ละกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบกับอายุ 7 วัน มีแนวโน้มลดลง
- 200 2) จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาถ่านหินแม่เมาะมีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย  
 201 NaOH เพิ่มขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18  
 202 โมลาร์

- 203 3) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65 °ซ และมีแนวโน้มลดลง  
 204 เมื่อใช้อุณหภูมิบ่มสูงถึง 90 °ซ
- 205 4) การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์  
 206 มอร์ตาร์ลดลง
- 207 5) การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งาน  
 208 ได้แก่ จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นในช่วง 14 ถึง 16 โมลาร์ และใช้  
 209 อุณหภูมิบ่ม 65 °ซ เนื่องจากให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ไปในทิศทางที่ดี

210

## 211 5. กิตติกรรมประกาศ

212 ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล  
 213 (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการ  
 214 การวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 130/2559

215

## 216 เอกสารอ้างอิง

- 217 [1] Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C. and Chalee, W., 2014, "Concrete durability presented by  
 218 acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results in marine  
 219 site," *Materials and Structures*, Vol. 47, pp.1501-1511.
- 220 [2] Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C., 2010, "Utilization of fly ash concrete in marine  
 221 environment for long term design life analysis," *Mater Design*, Vol. 3, pp.1242-1249.
- 222 [3] Chalee, W., and Chuapolb, T., 2013, "Evaluation of chloride penetration in fly ash concrete under  
 223 marine environment by ultrasonic wave", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 36 (2),  
 224 pp. 197-213 (In Thai).
- 225 [4] Davidovits, J. 1991, *Geopolymer inorganic polymeric new materials*. J Therm Anal 37, pp. 1633-  
 226 1659.
- 227 [5] Chindapasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., Rattanasak U., 2009, "Comparative study on the  
 228 characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers", *Waste Manage*, Vol. 29, pp. 539-543.
- 229 [6] Bakharev, T., 2005, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated  
 230 temperature curing", *Cem Concr Res*, Vol. 35, pp.1224-1232.
- 231 [7] Rattanasak, U., Chindapasirt, P., 2009, "Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash  
 232 geopolymer", *Miner Eng*, Vol. 22, pp. 1073-1078.
- 233 [8] Sanawong, C., Chalee, W., 2011, "Chloride penetration of fly ash-based geopolymer concrete  
 234 under marine environment", *The Journal of KMUTNB*, Vol. 21(2), pp. 257-265 (In Thai).

- 235 [9] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., 2008, *Cement, Pozzolan and Concrete*. 5<sup>th</sup> ed, Thailand  
236 Concrete Association, pp. 11-13, and pp. 238-240, (In Thai).
- 237 [10] Chindaprasirt, P., Chalee, W., 2014, "Effect of sodium hydroxide concentration on chloride  
238 penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine  
239 site", *Construction and Building Materials*, Vol. 63, pp. 303–310.
- 240 [11] Panha Huy, Soklam Mov, and Chalee, W., 2016, "Production of Hollow Load-Bearing Concrete  
241 Masonry Blocks from Fly Ash-Based Geopolymer", *Burapha Sci*, Vol. 12(2), pp. 31-46 (In Thai).
- 242
- 243
- 244
- 245
- 246
- 247
- 248
- 249
- 250
- 251
- 252
- 253
- 254
- 255
- 256
- 257
- 258
- 259
- 260
- 261
- 262
- 263
- 264
- 265
- 266
- 267



268 ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วถ่านหิน

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วถ่านหินแม่เมะ	
Silicon Dioxide, SiO <sub>2</sub> (%)	32.10
Aluminum Oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	19.90
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	16.91
Calcium Oxide, CaO (%)	18.75
Magnesium Oxide, MgO (%)	3.47
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O (%)	0.69
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O (%)	2.38
Sulfur Trioxide, SO <sub>3</sub> (%)	2.24
Loss On Ignition, LOI (%)	0.07

281

282

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ส่วนผสม	อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ (โดยน้ำหนัก)			
	แก้วถ่าน	ทราย	NaOH	Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>3</sub>
10-M	1	2.75	0.218	0.433
12-M	1	2.75	0.218	0.433
14-M	1	2.75	0.218	0.433
16-M	1	2.75	0.218	0.433
18-M	1	2.75	0.218	0.433

ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ส่วน ผสม	กำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )												ร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง			บ่มที่อุณหภูมิ 30 °ซ			บ่มที่อุณหภูมิ 65 °ซ			บ่มที่อุณหภูมิ 90 °ซ			อุณหภูมิ ห้อง	30 °ซ	65 °ซ	90 °ซ
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน				
10-M	116	151	205	140	160	181	189	221	310	113	132	170	177	129	164	150
12-M	140	194	242	162	208	263	211	222	333	117	124	189	173	162	144	162
14-M	143	201	257	166	243	248	217	280	351	137	159	172	180	149	166	126
16-M	172	258	272	234	256	280	230	282	346	149	172	234	158	120	150	157
18-M	149	209	246	193	236	266	203	257	326	164	169	199	165	138	170	121

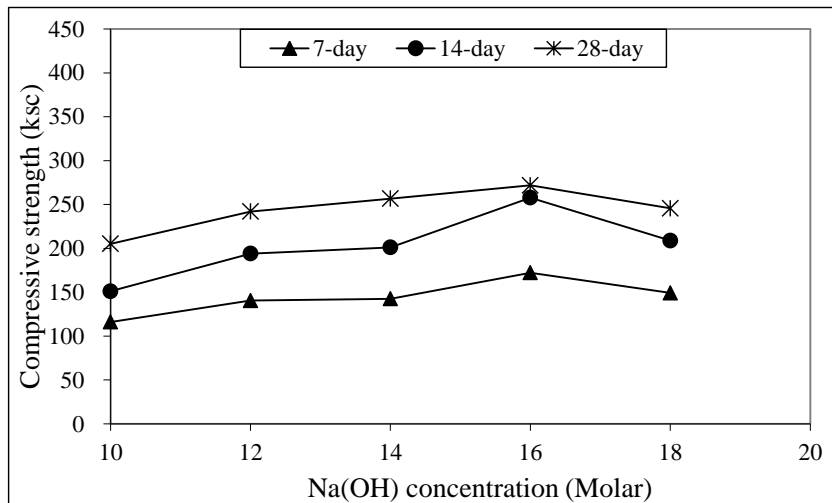
283



284

285

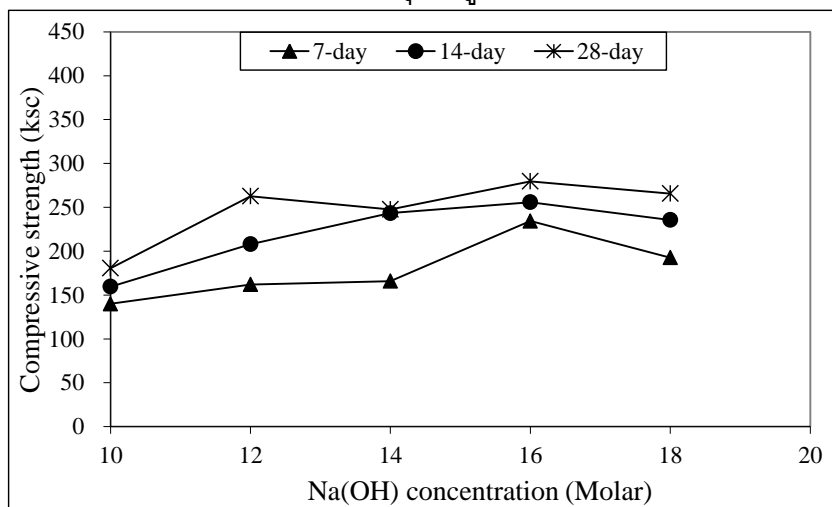
รูปที่ 1 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์



286

287

ก) ป๋มที่อุณหภูมิต้อง

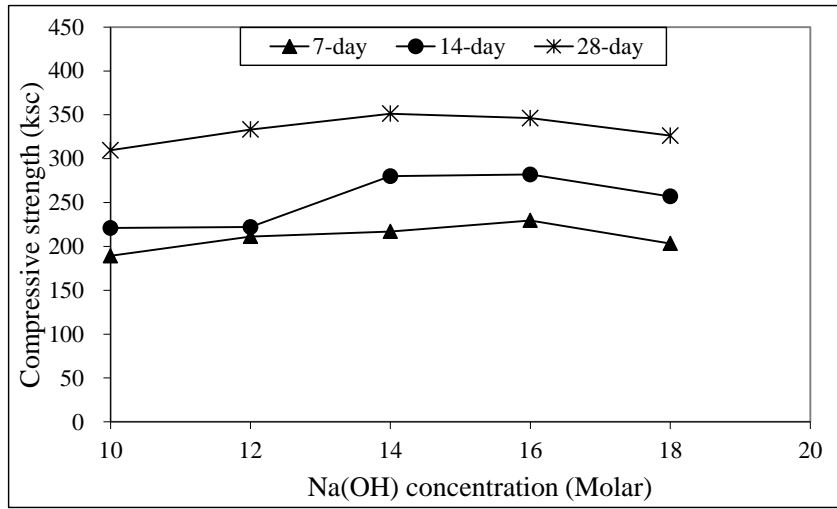


288

289

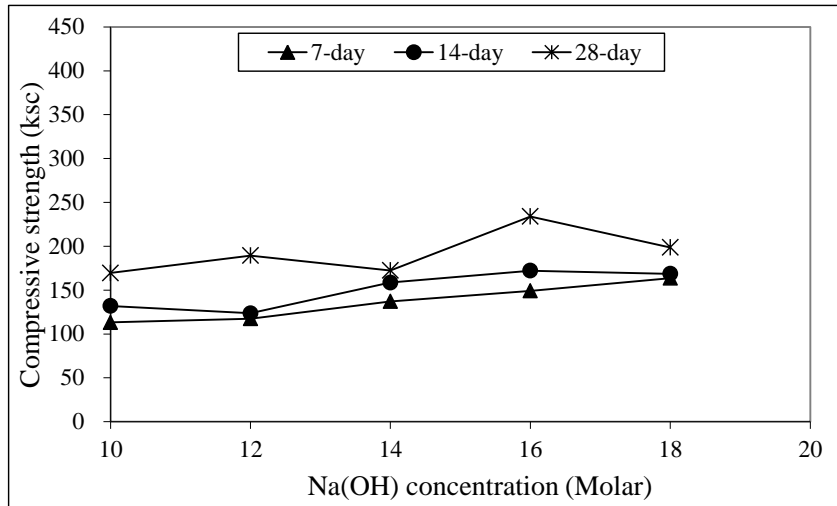
ข) ป๋มที่อุณหภูมิต้อง 30 °ซ

290



291  
292  
293

ค) ป๋มที่อุณหภูมิมิ 65 °ซ

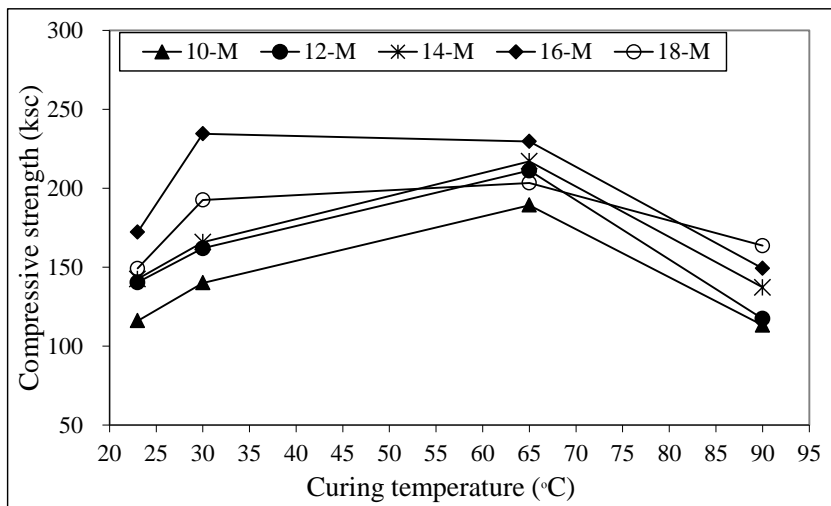


294  
295

ง) ป๋มที่อุณหภูมิมิ 90 °ซ

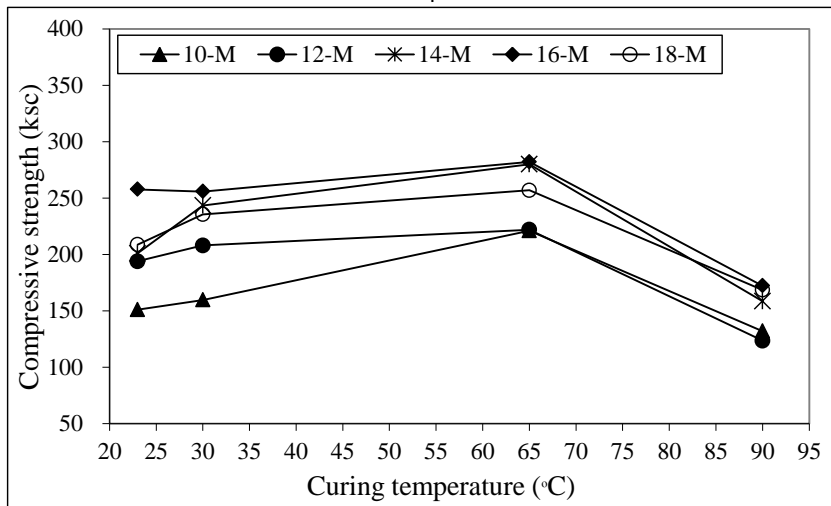
296  
297

รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอฟอลิเมอร์มอร์ต้าร์



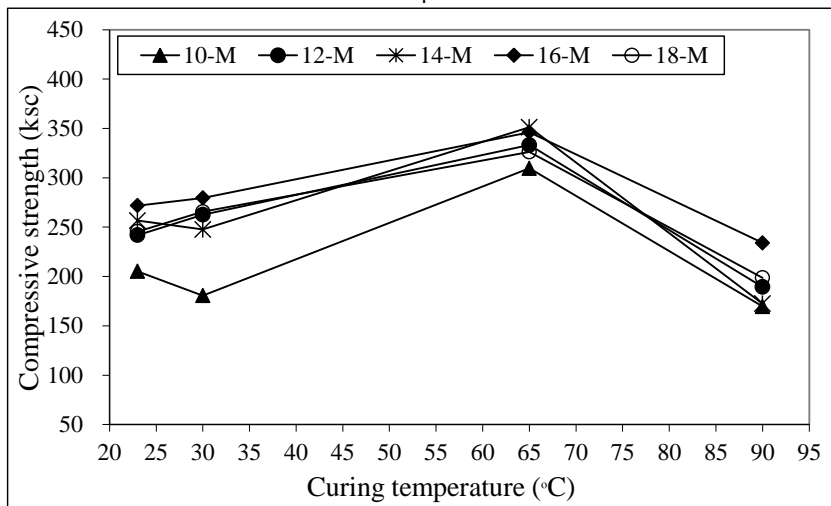
298  
299

ก) อายุ 7 วัน



300  
301

ข) อายุ 14 วัน



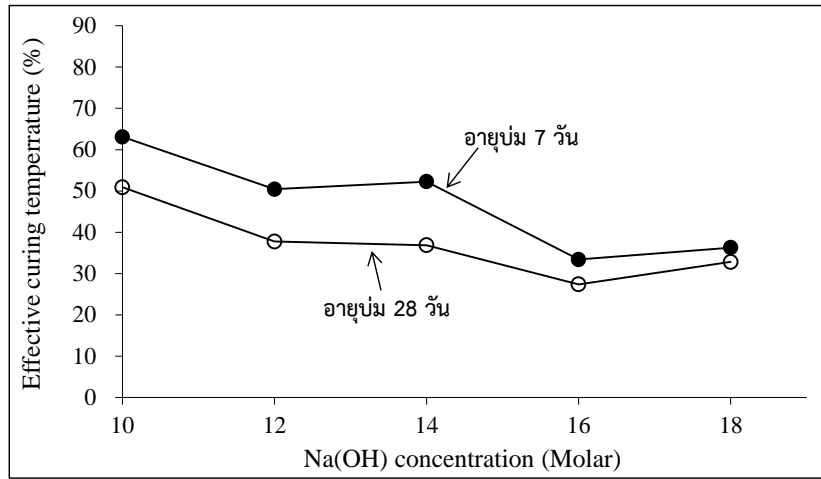
302  
303

ค) อายุ 28 วัน

304

รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิอบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

305



306

307

รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มไนจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

**ภาคผนวก ข**  
**รายงานการเงิน**

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2559A10802116 สัญญาเลขที่ 130/2559  
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ  
พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...ผลของอนุมูลมีปมต่อกำล้างอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำถ่านหิน

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

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...220,550 .....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2558...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...176,440.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2559.....

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

รวม ...396,990.....บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	120,000	120,000	0
3. ค่าวัสดุ	86,990	86,990	0
4. ค่าใช้สอย	190,000	190,000	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	44,110	44,110	0
<b>รวม</b>	<b>441,100</b>	<b>441,100</b>	<b>0</b>

(รศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

**ภาคผนวก ค**  
**ประวัตินักวิจัย**