



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการซึมผ่านน้ำและกำลังอัดของ

จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน

(Effect of Na(OH) concentration on water permeability and compressive strengths of fly ash-based geopolymer porous concrete)

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สนับสนุนโดย ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

#BK016654  
- 7 ก.ค. 2558

354926

กันยายน พ.ศ. 2556

เริ่มบริการ

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556  
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการซึมผ่านน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 มีงบประมาณทั้งโครงการ 347,500 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	347,500 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของขนาดมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อ กำลังอัด และอัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่าง Si/Al คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 3 ขนาด คือ 3/8'' (S), 1/2'' (M) และ 3/4'' (L) หล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนทรงลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม.<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มในอากาศ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบอัตราการไหลของน้ำในคอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้นแต่จะลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NaOH ลดลง นอกจากนี้พบว่า การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กลง ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นและอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนลดลง

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน, ความเข้มข้นของ NaOH, แก้วฉนวนหิน, กำลังอัด, อัตราการไหลของน้ำ

## Abstract

This research, the effect of size of coarse aggregate and sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength and water flow rate of porous geopolymer concretes were studied. Geopolymer concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The Si/Al ratio was kept constant and the concentration of NaOH was varied at 8, 10, 12, and 14 molar. The maximum size of coarse aggregate was varied as 3/8 (S), 1/2 (M) and 3/4 (L) - inch. The porous concrete cube specimens of  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  were cast for compressive strength test at 3, 14, and 28 days air cure and water flow rate of porous geopolymer concretes was also tested at 28 days. The results show that the compressive strength of porous geopolymer concrete increased with increase in NaOH concentration but a slight decrease of compressive strength was found when the NaOH concentration was up to 14 molar. The water flow rate of porous geopolymer concrete increased with the decrease of NaOH concentration. In addition, using the smaller size of coarse aggregate resulted in a higher compressive strength and lower water flow rate in porous geopolymer concrete.

**Keywords:** Geopolymer porous concrete, NaOH concentration, Fly ash, Compressive strength, Water flow rate

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ในงานจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุใหม่และยังไม่มีการใช้งานในเชิงพาณิชย์สำหรับประเทศไทย ให้สามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานในวงการก่อสร้างได้จริง ตลอดจนช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ เกี่ยวกับการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในงานคอนกรีต

# สารบัญ

## สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 คอนกรีตพูน	4
2.2 จีโพลิเมอร์	5
2.3 เถ้าถ่านหิน	11
2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์	19
2.5 โซเดียมซัลเฟต	19
2.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	20
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
<b>บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	<b>27</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	27
3.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง	29

<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล</b>	<b>35</b>
4.1 สมบัติของวัสดุในการทดสอบ	35
4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน	37
4.3 อัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน	42
4.4 ปริมาณอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน	44
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำ ปริมาณอากาศ และกำลังอัด ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน	47
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>51</b>
5.1 สรุปผล	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>52</b>
<b>ภาคผนวก ก</b>	<b>55</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์	8
2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติทางเคมีของเก้าถ่านหิน	17
3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน	30
4.1 สมบัติทางกายภาพของเก้าถ่านหินแม่เมาะ	36
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าถ่านหินแม่เมาะ	36
4.3 คุณสมบัติของมวลรวม	37
4.4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน	38
4.5 อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน	43
4.6 ร้อยละปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน	45



## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 อนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal	12
2.2 อนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed	13
3.1 เครื่องผสมมอร์ตาร์	28
3.2 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง	28
3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด	28
3.4 แบบหล่อปริมาตรทรงลูกบาศก์แบบเหล็ก	29
3.5 มวลรวมที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคอนกรีตพูน	31
3.6 วัสดุที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคอนกรีตพูน	31
3.7 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	32
3.8 การบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศ	33
3.9 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	33
3.10 การหาความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	34
3.11 อัตราการไหลของน้ำในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	34
4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	35
4.2 ผลของ Na(OH) ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	39
4.3 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน	40
4.4 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน	41
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน ที่อายุ 28 วัน	44
4.6 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน	44
4.7 ผลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการปริมาณอากาศของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน	46
4.8 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อปริมาณอากาศในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน	47
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับค่าการซึมผ่านของน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน	49

- 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าร้อยละปริมาณอากาศของน้ำของจีโอพอลิเมอร์  
คอนกรีตพรุนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน 50
- 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศ กับการซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
พรุนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน 50

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

คอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่ไม่ใช้มวลรวมละเอียดซึ่งมีการพัฒนาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่รักษาสภาพแวดล้อม และนำมาใช้ในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น งานปูผิวถนน งานคาดคลองและพื้นที่ที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงอยู่ได้ อาทิ พืชและสัตว์ขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมอื่นๆ เช่น ใช้เป็นฉนวนความร้อน เป็นวัสดุช่วยเก็บเสียง วัสดุช่วยระบายน้ำ รวมทั้งโครงสร้างทางชลศาสตร์สำหรับกั้นคลื่นกระแทก เป็นต้น

การศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตพูน จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผ่านมา (Chindaprasirt et al., 2008; Chindaprasirt et al., 2009) พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตพูนจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.20-0.25 โดยมีอัตราส่วนช่องว่างในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25 การใช้หินกรวดที่มีขนาดคละกันจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตพูนสูงขึ้นและให้ความพูนในระดับที่ใช้งานได้ดี โดยกำลังอัดของคอนกรีตพูนจะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตพูนที่มีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากัน การใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตพูนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้มวลรวมหยาบในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตพูนลดลง (Tongaroonsri et al., 2011) การผลิตคอนกรีตพูนที่ดีจะต้องได้ส่วนผสมที่ทำให้คอนกรีตพูนมีกำลังอัดที่สูงภายใต้ความพูนที่สูงด้วย ซึ่งเป็นการยากที่จะผลิตคอนกรีตให้มีลักษณะดังกล่าว เนื่องจากคอนกรีตที่มีความพูนสูงมักจะมีกำลังอัดต่ำลงอย่างชัดเจน (Lian et al., 2011) ดังนั้นแนวทางในการเลือกส่วนผสมเพื่อผลิตคอนกรีตพูนที่ดีควรพิจารณาจากกำลังอัดที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยให้มีความพูนมากที่สุด

การศึกษาวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตเริ่มมีในประเทศไทยมากขึ้น (Chalee et al., 2012; Sanawong et al., 2011; Chindaprasirt., 2009; Chawakitchareon et al., 2012) ทั้งนี้เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องของความเป็นวัสดุประสานได้โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่เป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแทน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ ตลอดจนเป็นแนวทางที่ส่งเสริมการลดมลพิษและสภาวะโลกร้อน ที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ได้ การผลิตวัสดุประสานที่เป็นจีโอพอลิเมอร์ เป็นการใส่สารปอชโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไล สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ (Temuujin et al., 2010; Davidovits et al., 1999) ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์พิเศษจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ สารปอชโซลานที่สามารถใช้

ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ แก้ว ถ่านหิน เถ้าแกลบ ดินขาวเผา เป็นต้น นอกจากนั้น การศึกษาที่ผ่านมา (Tongaroonsri et al., 2013) พบว่า การผสมซิลิกาฟูล์มในแก้วถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ สามารถทำให้กำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการนำแก้วถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์อีกทางด้วย สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการใช้งานคอนกรีตที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขาดความมั่นใจในการนำมาใช้งาน เพราะฐานข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังมีไม่มากพอ ตลอดจนการใช้วัสดุประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถก่อสร้างได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้ช่างที่มีความชำนาญสูงมาก ประกอบกับยังไม่เกิดปัญหาขาดแคลนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตาม แนวทางส่งเสริมเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างจริงจังในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ควรเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เป็น การสนับสนุนและเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานให้มากขึ้น โดยเริ่มจากการใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตที่ไม่มีความซับซ้อนมาก และมีลักษณะการรับแรงเชิงกลที่ไม่เสี่ยงต่อการวิบัติและก่อให้เกิดอันตราย ตลอดจนส่งเสริมให้มีการใช้งานในงานก่อสร้างคอนกรีตพื้นฐาน เช่น คอนกรีตพูน คอนกรีตบล็อกปูพื้น หรือวัสดุงานก่อผนัง เป็นต้น การเริ่มต้นใช้งานดังกล่าวจำเป็นต้องมีข้อมูลการวิจัยที่น่าเชื่อถือได้เป็นฐานข้อมูลประกอบ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการผลิตคอนกรีตพูนโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่ใช้แก้วถ่านหินในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน โดยมุ่งประเด็นไปที่ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และขนาดมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) ศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการพัฒนากำลังอัด ความหนาแน่น และการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพูนที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เปสต์จากแก้วถ่านหินเป็นวัสดุประสาน

1.2.2) ศึกษาผลของขนาดของมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูนที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เปสต์จากแก้วถ่านหินเป็นวัสดุประสาน

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากแก้วถ่านหินแม่เมาะ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่ และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14

โมลาร์ มวลรวมใช้หินปูนเป็นมวลรวมหายาบ 3 ขนาด ได้แก่ หิน 3/8" (S) หิน 1/2" (M) และหิน 3/4" (L) ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบได้ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทั้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นผสมเข้ากันให้เข้ากันกับสารที่เตรียมไว้แล้วใส่มวลรวม โดยหล่อตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 มม<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดโดยอ้างอิงกับมาตรฐาน BS 1881 ซึ่งเป็นมาตรฐานในงานคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบ จากนั้นทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุบ่มในอากาศ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบอัตราการไหลของน้ำที่อายุ 28 วัน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเข้ากันหินเพื่อให้ได้คอนกรีตพูนที่มีกำลังอัดสูง การซึมผ่านน้ำสูง และความหนาแน่นต่ำ ตลอดจนสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตคอนกรีตพูนโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ให้สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.4.2 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดพลังงาน ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน (Porous concrete) คือคอนกรีตที่ไม่มีมวลละเอียดในส่วนผสมเพื่อต้องการให้มีโพรงที่ต่อเนื่องอยู่ในซึ่งน้ำหรือของเหลว และอากาศซึมผ่านได้ โดยสามารถที่จะออกแบบคุณสมบัติได้อย่างหลากหลายแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ทั้งในด้านความแข็งแรง ความสามารถในการระบายน้ำ ความสามารถในการอุ้มน้ำ และความสามารถด้านอื่นๆ

คอนกรีตพรุนได้ถูกคิดค้นและพัฒนาในประเทศอังกฤษและอเมริกาเป็นเวลามากกว่า 30 ปี เพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่รักษาสภาพแวดล้อม และนำมาใช้ในรูปแบบที่หลากหลาย คอนกรีตพรุนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในอเมริกาและประเทศญี่ปุ่น กล่าวคือได้นำคอนกรีตพรุนมาใช้สำหรับงานปูผิวถนน ใช้ในการลาดคลองและพื้นที่ที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงอยู่ได้ อาทิ พืชและสัตว์ขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมอื่นๆ เช่น ใช้เป็นฉนวนความร้อน ด้านการเก็บเสียงและด้านการระบายน้ำรวมทั้งสามารถทำพื้นผิวทางสำหรับเดินเท้าและสำหรับขุดยานพาหนะ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงงานปรับแต่งภูมิสถาปัตยกรรมอื่นๆ อาทิ สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับพื้นผิวที่ต้องสัมผัสกับน้ำอยู่เสมอ เช่น ห้องน้ำสาธารณะ บันได เกลียงนอกบ้าน และทางเดินในสวนหย่อม เพื่อป้องกันการลื่นล้มได้เป็นอย่างดีเนื่องจากคอนกรีตประเภทนี้มีการระบายน้ำได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้คอนกรีตพรุนจะมีความสำคัญและเป็นที่แพร่หลายในอนาคต

##### 2.1.1 โครงสร้างของคอนกรีตพรุน

โครงสร้างของคอนกรีตพรุนนั้น ประกอบไปด้วยเฟสของซีเมนต์เพสต์ มวลรวม และ ช่องว่างที่ต่อเนื่องกันภายใน โดยเฟสของซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เป็นเหมือนกาวเชื่อมประสานให้มวลรวมยึดติดเข้าด้วยกันและเป็นตัวที่รับกำลังเป็นหลัก โดยมวลรวมที่ยึดติดกันนั้นเป็นมวลรวมที่มีขนาดคละขนาดช่วง ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตพรุนมีปริมาณช่องว่างอากาศภายในที่ต่อเนื่องกันมากกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป จึงส่งผลให้คอนกรีตพรุนมีความสามารถยอมให้น้ำซึมผ่านได้มากกว่าคอนกรีตปกติ

##### 2.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตพรุน

1. รับน้ำหนักแรงกดได้มาก เพราะ วัสดุหลักที่นำมาใช้ผลิตคอนกรีตพรุนคือ ซีเมนต์ และหิน เหมือนคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไปแต่ไม่ใช้ทรายในส่วนผสม เพื่อให้เกิดรูพรุนของวัสดุแต่มีจุดอ่อนตรงที่ดิ่งไม่ได้ คัดไม่ได้ และใส่เหล็กไม่ได้

2. การซึมผ่านของน้ำ น้ำสามารถซึมผ่านเข้าสู่โครงสร้างคอนกรีต โดยผ่านช่องว่างที่ถูกออกแบบให้ต่อเนื่องกัน (Interconnected Void) จากการซึมผ่านของแรงดันน้ำ (Hydraulic Permeability) และการซึมผ่านของแรงตึงผิวน้ำ (Water Absorbed by Capillary Action) ดังนั้น การเพิ่มการซึมผ่านของน้ำในโครงสร้างคอนกรีตสามารถทำได้โดยเพิ่มช่องว่างที่เชื่อมต่อกันให้มากที่สุดนั่นเอง ซึ่งการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตให้มีการระบายน้ำที่ดีโดยทำให้คอนกรีตมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกันให้มากที่สุดนั้นสามารถทำได้โดย

1. การออกแบบส่วนผสมที่ดีทั้งด้านความต่อเนื่องของช่องว่าง และกำลังอัด
2. มีวิธีการทำงานที่ถูกต้องและการอัดแน่นคอนกรีตอย่างถูกวิธีโดยไม่ไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต

3. การลดอุณหภูมิความร้อนในเวลากลางวัน โดยจะทำให้อาคาร บ้านเรือน เป็นการลดการสะสมความร้อน ทำให้ไอน้ำในใต้พื้นดินระเหยขึ้นมา จนเกิดเป็นความชุ่มชื้นกับผู้อยู่อาศัย และรู้สึกเย็นสบายมากกว่าเดิม เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้มีความพรุนมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสม ซึ่งจุดเด่นดังกล่าวช่วยให้การระบายอากาศดีกว่า และอากาศสามารถถ่ายเทได้สะดวก

4. ไม่ทำให้เกิดน้ำขัง เพราะน้ำจะซึมผ่านลงไปชั้นใต้ดิน ทำให้ไม่สะสมเป็นตะไคร่น้ำที่ทำให้ลื่นในช่วงหน้าฝน และยังช่วยลดปัญหาน้ำท่วมได้อีกด้วย

## 2.2 จีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในการก่อสร้างโดยเฉพาะในประเทศไทย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคอนกรีตเพราะทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานส่วนผสมอื่น กระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ใช้พลังงานสูงมาก การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความพยายามในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยการพัฒนาคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานปริมาณสูง และปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลยอย่างกว้างขวาง สารซีเมนต์ดังกล่าวสาขาที่เรียกว่า “สารจีโอพอลิเมอร์” (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำปฏิกิริยา

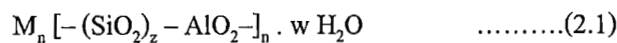
ลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้

จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งพบครั้งแรกโดย Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ นิยามของจีโอพอลิเมอร์ กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davidovits ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางธรณีเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่รูปอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมินามากระตุ้นด้วยด่าง กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์แตกต่างกับเพชรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าลอยซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแกลบ เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แร่ดินเบาจากพื้นที่ภาคเหนือ และดินขาวจากพื้นที่บริเวณจังหวัดระนอง เป็นต้น

ส่วนผสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์จะใช้เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาถ่านหินชนิดใดก็ได้ เถ้าถ่านหินมีสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือ เทา น้ำตาล ถึง น้ำตาลแดง หรือน้ำตาลเหลือง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน วิธีการเผาและอุณหภูมิขณะเผาถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยปกติจะมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินาไตรออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์รัสไตรออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ผลรวมของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 90 โดยน้ำหนัก

### 2.2.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1999)

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 พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในการทำจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60 ถึง 90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali Silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

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

### 2.2.2 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1999)

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เจือต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ  $\text{AlO}_4$  และ  $\text{SiO}_4$  สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมาก และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

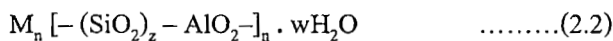
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิเกต
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ใน สารละลาย	การชะของแข็งที่ Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควบแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาในเฟส
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

### 2.2.3 คุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

#### 2.2.3.1 ในด้านการศึกษา

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี วัสดุนี้นี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสาร โพลีไซอะเลต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si - O - Al - O] จากสูตร



ถ้า z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไซลอคโซ (PSS)

ถ้า z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซลอคโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ อาทิเช่น อัตราส่วน 1, 2, และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ หากอัตราส่วนสูงกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมขวาง หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบพอลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ 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 สำหรับประเภทเหล็ก จะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 750 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส ส่วนประเภทซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) จะทำการผสมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 1,800 องศาเซลเซียส

### 2.2.3.2 ในด้านอุตสาหกรรม

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิต่ำ โดยสามารถผลิตวัสดุประเภทนี้จากสารประกอบที่มีซิลิกาหรือทั้งซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่สามารถละลายในสารละลายอัลคาไล จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น เช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์

วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ คือสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดที่เป็นที่ยอมรับได้ในเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่า วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่งและงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้

คุณสมบัติที่ดีเช่นประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง มีความเสถียรทางความร้อน มีความทนทานเป็นเลิศ และมีความต้านทานต่อการครูดสูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุอิโพออลิเมอร์ สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้นเซรามิกส์และซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัสดุอิโพออลิเมอร์ยังสามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และทนต่อเปลวไฟได้ถึง 50 กิโลเมตรต่อตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควันเมื่อได้รับฟลักซ์ทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือน พอลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้นวัสดุอิโพออลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการทำงานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

### 2.2.3.3 ในด้านเศรษฐศาสตร์และสังคม

#### - การปรับสภาพของเสียที่มีพิษ

การตรึง (Immobilisation) ของเสียที่มีพิษด้วยการผสมของเสียในวัสดุอิโพออลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุอิโพออลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือ เฟลด์สปาทรอยด์ (Feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีที่ดี หรือทำของเสียเป็นก้อน (Solidify) ของเสียทางเคมีประเภทนี้ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของสารนิวเคลียร์ วัสดุอิโพออลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถตรึงของเสียที่มีพิษไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง 3 มิติของวัสดุอิโพออลิเมอร์

#### - ปรากฏการณ์โลกร้อนและการประหยัดพลังงาน

ในปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ 1 ตัน จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สู่บรรยากาศ 1 ตัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) แต่สำหรับวัสดุประสานอิโพออลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากการผลิตวัสดุอิโพออลิเมอร์ ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุอิโพออลิเมอร์สามารถหาได้ทั่วไป โดยเป็นวัสดุที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และดินขาว เป็นต้น ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สู่บรรยากาศได้เป็นอย่างดี

#### - เศรษฐศาสตร์

การผลิตวัสดุอิโพออลิเมอร์จะใช้ต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากจะใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ให้คุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวัสดุอิโพออลิเมอร์จะต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบรูณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงมากนัก คือที่ประมาณ 45 ถึง 90 องศาเซลเซียส หากต้องการผลิตวัสดุอิโพออลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น เสา กาน ผนัง และพื้นสำเร็จรูป สามารถใช้ผลิตเหมือนคอนกรีตสำเร็จ (Precast Concrete) ได้ ซึ่ง

เหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันจะเห็นว่าคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมากเนื่องมาจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นวัสดุซีโอพอลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

### 2.3 เถ้าถ่านหิน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับ โดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า เถ้าที่ได้นี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมกับน้ำ จึงเป็นแนวคิดในการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานก่อสร้างแทนปูนซีเมนต์และเพื่อลดปัญหาด้านมลภาวะได้อีกด้วย และเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา เรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอน หรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า

#### 2.3.1 ถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่

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

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

#### 2.3.2 การเผาถ่านหิน

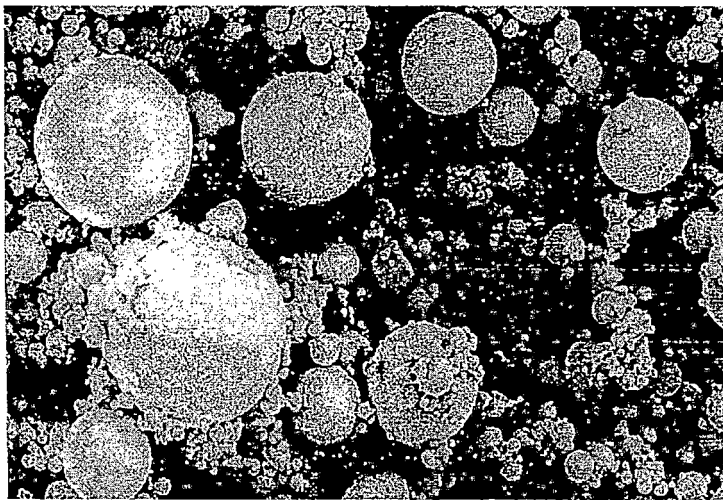
การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

1. การเผาความร้อนสูง

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

## 2. การเผาความร้อนปานกลาง

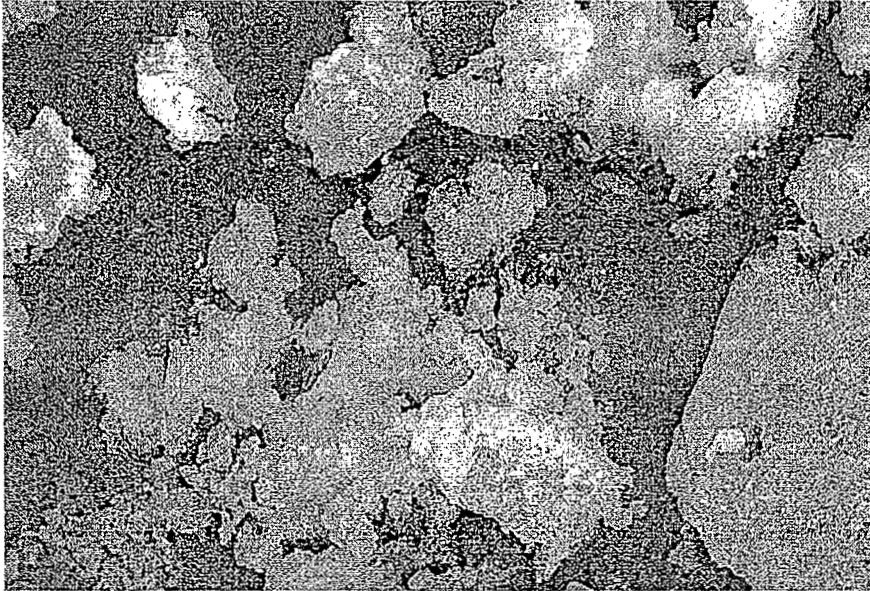
อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้า-ลอย ที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตาเถ้าลอยที่ได้จากการเผาประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

## 3. การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) ดังรูปที่ 2.2 และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ

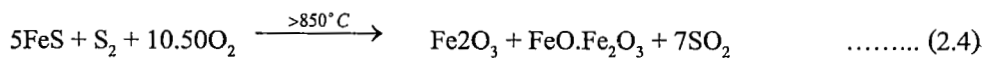
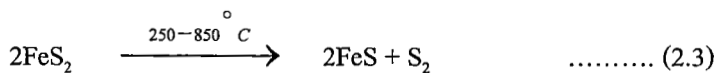


รูปที่ 2.2 อนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

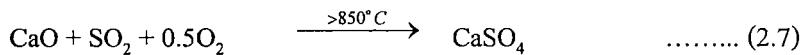
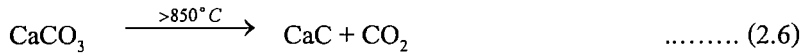
ในกระบวนการเผาเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆดังที่กล่าวมาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผาดังต่อไปนี้

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

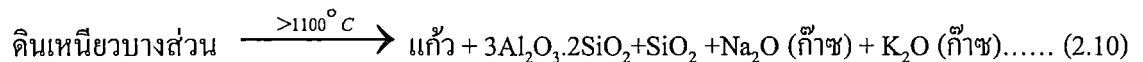
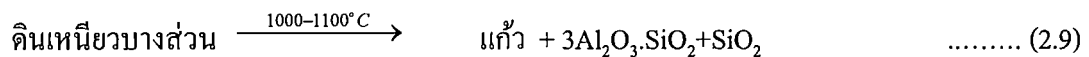
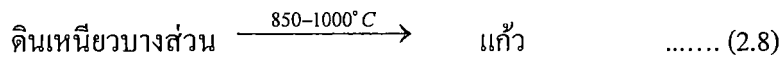
1. ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแมกเนไทต์ ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของเถ้าถ่านหินดังสมการ



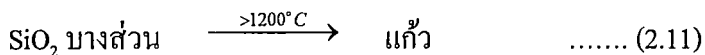
2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และแอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) ดังสมการ



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



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



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

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

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย ถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นถ่านหินกวาง



### 2.3.3 ชนิดของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน

มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferricoxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ต่ำทำให้เถ้าถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ต่ำด้วย

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

### 2.3.4 รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เมื่อเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) เถ้าถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกัน ของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่อขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

เถ้าถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้าถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลาย

ร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของแก้วด้านหินกลวงคือแก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากแก้วด้านหินกลวงเป็นแก้วด้านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำแก้วด้านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง (Acoustic)

แก้วด้านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิด ไคซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ด้านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนแก้วด้านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคด้านหิน จึงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

### 2.3.5 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคแก้วด้านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอนโดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน แก้วด้านหินแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของแก้วด้านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยแก้วด้านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.<sup>2</sup>/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer -Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของแก้วด้านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.<sup>2</sup>/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.<sup>2</sup>/ก.

การวัดความละเอียดของแก้วด้านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนแก้วด้านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 แก้วด้านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30

### 2.3.6 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของแก้วด้านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 แก้วด้านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของแก้วด้านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากด้านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของแก้วด้านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด แก้วด้านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าแก้วด้านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากแก้วด้านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีแก้วด้านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าแก้วด้านหินละเอียด

### 2.3.7 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์

(SiO<sub>2</sub>), อะลูมินัมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), เฟอริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 4 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุผลนี้ ASTM C618 จึงได้แยกประเภทของถ่านหินไว้ 2 ชนิด คือ Class C และ Class F โดย Class F มีปริมาณ SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และ Class C จะมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าว ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), โซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O), โพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H<sub>2</sub>O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติทางเคมีของถ่านหิน

คุณสมบัติ	ASTM C 618 (%)	
	Class F	Class C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	Class C
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	7.0	Class C
ปริมาณความชื้นมากที่สุด	7.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	7.0	3.0
อัลคาไลน์ในรูปของ Na <sub>2</sub> O มากที่สุด	7.0	3.0

### 2.3.8 ปฏิกิริยาปอซโซลานของถ่านหิน (Pozzolanic Reaction)

ความสามารถของถ่านหิน ในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของถ่านหิน คือ ถ่านหินที่มีความละเอียดมากปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าถ่านหินที่มีความละเอียดน้อยกว่า และในทำนองเดียวกันถ่านหินที่มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนต่ำก็จะมีการพัฒนากำลังได้ไวเช่นกัน ความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

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

โดย A = กำลังอัดของมอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านหินร้อยละ 20

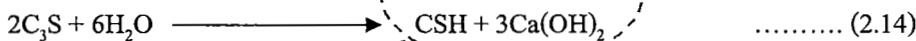
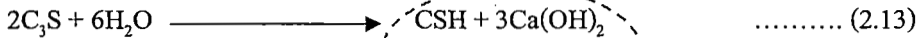
B = กำลังอัดของมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่มีถ่านหิน

ASTM C168 ได้กำหนดว่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ดมาตรฐานที่อายุ 28 วัน

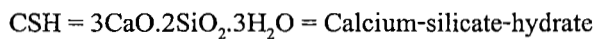
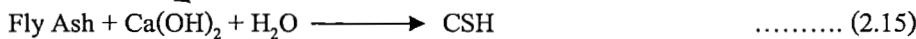
กระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Cement Gel) และในขณะที่เดียวกันนี้จะเกิดสารประกอบขึ้นมา 2 ชนิด คือ C-S-H และ Ca(OH)<sub>2</sub> หลังจากนั้น Ca(OH)<sub>2</sub> ทำปฏิกิริยากับ SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินให้สารประกอบมีคุณสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เฟส มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตจะดีขึ้นตามไปด้วย

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริณญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

ปฏิกิริยา Silicate Hydration



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก



2.3.9 การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตที่สำคัญได้แก่ การต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต การทำลายโดยกรด การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และการต้านทานคาร์บอนชั้น ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม

2.3.9.1 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การทำลายของสารซัลเฟต

เถ้าถ่านหินสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตจากซัลเฟตได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าถ่านหิน Class F จะต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า Class C การต้านทานการกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้เปลี่ยนรูปของ Ca(OH)<sub>2</sub> ให้เป็น CSH ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทนต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่า Ca(OH)<sub>2</sub> อย่างมาก

2.3.9.2 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การทำลายโดยกรด

การใช้ถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะเพิ่มความต้านทานของการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 10 ได้สูงขึ้นกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน

### 2.3.9.3 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การซึมผ่านของคลอไรด์

คลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตจะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม การใช้เถ้าถ่านหินสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต และการใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้นกว่า คอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน

### 2.3.9.4 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การเกิดคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชัน (Carbonation) เป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก pH 13 เหลือเพียง 8-9 และทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลายได้เช่นกัน

การใช้เถ้าถ่านหินแม้จะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันเร็วขึ้น แต่การใช้เถ้าถ่านหินทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การเกิดคาร์บอนเนชันลดลงเช่นกัน

## 2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือ โซดาไฟเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ที่ละลายได้ในน้ำ ประกอบด้วยโลหะโซเดียม และเบสไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นของแข็ง (ในรูปแบบผง เกล็ด เป็นแท่งหรือเม็ดกลม) สีขาว ไม่มีกลิ่น จุดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 318 องศาเซลเซียส ผลิตได้จากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของน้ำเกลือ และเป็นสารเคมีที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ สบู่และผลิตภัณฑ์ซักฟอก เคมีภัณฑ์ทำความสะอาด โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมโลหะ อาหาร เส้นใยเรยอน สิ่งทอ ใช้ในการฟอกย้อม ล้างสีไหม และช่างเจียรระโนพลอยก็ใช้ในขั้นตอนล้างเม็ดพลอยที่เจียรระโนเสร็จแล้ว นอกจากนั้นยังใช้ปรับสภาพน้ำทิ้งที่มีฤทธิ์เป็นกรด ให้เป็นกลางก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย

## 2.5 โซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) หรือที่รู้จักกันในชื่อ "น้ำแก้ว หรือ น้ำกาว" เป็นสารประกอบไปด้วย โซเดียมออกไซด์, ซิลิกา และน้ำ ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และสารเคมีตัวนี้เป็นน้ำยาบ่มคอนกรีตชนิด โซเดียม ซิลิเกต สามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีตและปูนฉาบได้เป็นอย่างดี หน้าที่ถูก กำหนดให้มาทำปฏิกิริยากับหินปูน ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮโดรชันอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งขึ้น ลดรูพรุนที่เกิดจากน้ำในคอนกรีตที่ระเหยออกมาได้ โซเดียมซิลิเกตมีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมก่อสร้าง และกำลังมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อมและทำให้เกิด โครงสร้างของพวก จีโอโพลิเมอร์ที่

ไม่จำเป็นต้องเผาสูงเหมือนการผลิตเซรามิก สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกถือว่าเป็นสัดส่วนที่น้อยมากๆเมื่อเทียบกับการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ

## 2.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

การทดสอบกำลังอัดเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะเป็นการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้งานรูปทรงของคอนกรีตที่นิยมใช้ใน การทดสอบเพื่อหาลำดับของคอนกรีตที่นิยมกันมี 2 แบบ คือ รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก สำหรับในประเทศไทยพบว่านิยมใช้ทั้ง 2 ประเภท เนื่องมาจากอิทธิพลของบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาจากประเทศอังกฤษในระยะแรกที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ และในระยะหลังที่บัณฑิตส่วนใหญ่จบการศึกษาจากสหรัฐอเมริกา แคนาดา และออสเตรเลีย ที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ก่อนอื่นต้องขอแนะนำ ถึงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 2 ประเภท ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งขนาด วิธีการเตรียมการ ตลอดจนให้ผลของกำลังอัดที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.6.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปลูกบาศก์

แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์เป็นแบบเหล็กขนาด 15 ซม. ทำจากเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว ผิวเรียบและสามารถป้องกันไม่ให้น้ำปูนรั่วออกจากแบบในระหว่างที่เทหรือมีคอนกรีตอยู่ในแบบ ก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบางๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น การทาน้ำมันมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันส่วนเกินทำให้มีปัญหาเรื่อง การแข็งตัวและลดกำลังของคอนกรีต การหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้ มาตรฐาน BS 1881 Part 108 โดยใส่คอนกรีตลดลงในแบบมาตรฐานขนาด 15x15x15 ซม<sup>3</sup> จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นให้เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบ โตะหรือกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งอย่างน้อย 35 ครั้ง เหล็กกระทุ้งมีน้ำหนัก 1.8 กก. ยาว 38 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 ซม. กระทุ้งคอนกรีตอย่างเต็มที่เพื่อให้เป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อในอาคาร ต่างๆ ซึ่งได้รับการกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นอย่างเต็มที่เช่นเดียวกัน แต่การกระทุ้งจะต้องไม่มากจนทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว ภายหลังจากกระทุ้งเรียบร้อยแล้วจึงปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทิ้งคอนกรีตไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 จากนั้นถอดแบบออกและนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 18 ถึง 22 องศาเซลเซียส การทดสอบนิยมทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วันซึ่งมักเป็นอายุที่ใช้ในการออกแบบ แต่ทั้งนี้ยังสามารถทำการทดสอบที่อายุอื่นเช่นที่ 3, 7, 14 และ 90 วัน ก็ได้ หากทำการออกแบบกำลังของคอนกรีตที่ใช้งานตามอายุดังกล่าว

การทดสอบ กำลังอัดใช้คอนกรีตที่ผ่านการบ่มและอยู่ในสภาพเปียก โดยใช้หน้าที่เรียบของคอนกรีต 2 ด้านตรงกันข้ามเป็นด้านรับแรง ดังนั้นผิวหน้าด้านที่ปาดให้เรียบจะตั้งฉากกับแกนของแรงกด การให้น้ำหนักกระทำแก่คอนกรีตใช้อัตราคงที่ที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ 0.40 เมกะปาสกาลต่อวินาที จนกระทั่งคอนกรีต

วิบัติและไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นได้ต่อไปอีก การให้อัตรากดต่อคอนกรีตที่เร็วมาก ๆ จะทำให้กำลังที่ทดสอบได้สูงกว่าความเป็นจริง และในทางกลับกัน การให้อัตรากดที่ช้ามากจะทำให้กำลังที่ทดสอบได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

### 2.6.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

แบบหล่อมาตรฐานสำหรับเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. สูง 30 ซม. ทำจากเหล็กมีความแข็งแรงผิวด้านในเรียบ สามารถคงรูปทรงกระบอก และสามารถป้องกันน้ำปูนหรือคอนกรีตไม่ให้รั่วออกมาจากแบบหล่อได้

มาตรฐาน ASTM C192 ได้กำหนดให้หล่อคอนกรีตลงแบบมาตรฐานเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรคอนกรีตเท่าๆกัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้งด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 61 ซม. โดยชั้นที่ 2 และ 3 ต้องกระทุ้งให้ทะลุลงไปยังชั้นที่ต่ำกว่าประมาณ 2.5 ซม. เพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง เมื่อครบทั้ง 3 ชั้นแล้วจึงทำการปาดผิวหน้าของคอนกรีตให้เรียบ และทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิระหว่าง 16 ถึง 27 องศาเซลเซียส โดยไม่รบกวนจนคอนกรีตแข็งตัว การถอดแบบจะทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 248 ชั่วโมงและนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบกำลังตามอายุที่กำหนด

เนื่องจากการหล่อคอนกรีตแบบนี้ผิวด้านบนของคอนกรีตจะไม่เรียบพอ ASTM C617 ระบุให้ผิวหน้าของคอนกรีตที่นำมาทดสอบต้องเรียบและแตกต่างกันไม่เกิน 0.05 มม. ซึ่งอาจทำได้โดยการขัดผิวให้เรียบแต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองและใช้เวลามาก ดังนั้นจึงนิยมใช้การเคลือบหัว (capping) คอนกรีต ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ การใช้ซีเมนต์เพสต์ชั้นเทพบนหัวคอนกรีตตอนเทเสร็จใหม่ๆ การใช้กัมมะถัน และ ปูนพลาสติกกำลังสูงเคลือบหัวคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การทดสอบคอนกรีตโดยไม่ทำให้ผิวหน้าเรียบจะทำให้กำลังที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ผิวหน้าของคอนกรีตที่ไม่เรียบหรือเอียงเพียง 0.25 มม. อาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงได้ถึงร้อยละ 33 และจะลดลงมากกว่านี้เมื่อเป็นคอนกรีตกำลังสูง กำลังของวัสดุที่ใช้เคลือบหัวคอนกรีตควรเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกำลังอัดของ คอนกรีตที่ทดสอบ ผิวเคลือบหัวคอนกรีตควรบางประมาณ 1.5 ถึง 3 มม. ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมรับแรงของคอนกรีตภายใต้การทดสอบกำลังอัด นอกจากนี้ภายหลังการเคลือบหัวคอนกรีตแล้วต้องทิ้งให้วัสดุที่เคลือบคอนกรีต แข็งตัว เช่น ถ้าวัสดุเคลือบผิวเป็นกัมมะถันควรทิ้งให้แข็งตัวอย่างต่ำ 2 ชั่วโมง มิฉะนั้นเมื่อทดสอบการรับกำลังอัดคอนกรีตผิวเคลือบที่ยังไม่แข็งตัวเต็มที่ จะแตกเสียหายก่อนทำให้กำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

โดยทั่วไป นิยมใช้กัมมะถันเคลือบหัวคอนกรีตสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังไม่สูงมาก กรณีที่คอนกรีตมีกำลังสูงมากจะใช้การขัดผิวหน้าให้เรียบ กัมมะถันที่ใช้เคลือบผิวหน้าไม่ควรนำกลับมาใช้ใหม่หลายครั้ง เพราะจะมีเศษคอนกรีต ผุ่น และทรายปนกลับมาทำให้คุณภาพของกัมมะถันลดลง นอกจากนี้กัมมะถันที่นำกลับมาใช้อีกหรือที่เหลืออยู่ในหม้อต้มและผ่านการต้ม หลายครั้งจะมีกำลังต่ำลง ดังนั้นจึงควรตรวจสอบว่ากัมมะถันที่ใช้ไม่มีปัญหาดังกล่าว

รายละเอียดของ การเคลือบหัวคอนกรีตมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C617 ในการเคลือบด้วยกำมะถันจะใช้แบบเหล็กผิวเรียบและแทนสำหรับตั้งคอนกรีตให้ การเคลือบหัวทำโดยการเทกำมะถันเหลวซึ่งตมที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส ลงบนแบบเหล็กที่ทาน้ำมันเครื่องบางๆเพื่อป้องกันกำมะถันติดผิวหน้าแบบเหล็ก จากนั้นจึงคว่ำหัวคอนกรีตที่ต้องการเคลือบลงบนกำมะถันเหลวและให้ตั้งฉากกับ ผิวหน้าของแบบเหล็ก หลังจากนั้นรอให้กำมะถันแข็งตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ถึง 2 นาที สามารถดึงคอนกรีตที่มีกำมะถันเคลือบหัวอยู่ออกมาจากแบบ ส่วนการเคลือบโดยใช้ปูนปลาสเตอร์กำลังสูงจะใช้แผ่นแก้วทาด้วยน้ำมันบางๆกด ปูนปลาสเตอร์ลงให้เรียบบนผิวหน้าคอนกรีตที่ต้องการเคลือบหัว และเมื่อปูนปลาสเตอร์แข็งตัวจะสามารถเอาแผ่นแก้วออกได้

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกในการทดสอบกำลังอัดมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้มาตรฐานตามแบบอเมริกัน หรือของ ว.ส.ท. เป็นหลัก แม้ว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจะเป็นที่นิยมและใช้เป็นมาตรฐานในการคำนวณและออกแบบก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติพบว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์มีข้อดีหลายอย่าง เช่น คอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจึงมีน้ำหนักเบา กว่า (คอนกรีตรูปลูกบาศก์หนักประมาณลูกละ 8-8.5 กิโลกรัม ขณะที่คอนกรีตรูปทรงกระบอกหนักประมาณ 12.5-13 กิโลกรัม) สามารถเก็บและบ่มในน้ำ โดยใช้พื้นที่ที่กรบ่มที่น้อยกว่ากรณียของคอนกรีตรูปทรง กระบอก นอกจากนี้ในการทดสอบกำลังอัดยังสามารถใช้ผิวด้านที่เรียบทำการทดสอบได้ ทั้งนี้แต่ถ้าเป็นคอนกรีตรูปทรงกระบอกต้องหล่อหัวเคลือบหน้าคอนกรีตให้เรียบก่อนทำ การทดสอบ ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีข้อดีกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์หลายประการ เช่นการหล่อและการทดสอบในแนวตั้งเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะของการเทและรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตในงานจริงโดยทั่วไป ดังนั้นจึงถือว่ามีคามเหมือนจริงมากกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ทิศทางการเท และการทดสอบคอนกรีตจะตั้งฉากกัน นอกจากนี้คอนกรีตรูปทรงกระบอกยังมีผลกระทบจากขนาดของหินน้อยกว่าและการกระจายของหน่วยแรงสม่ำเสมอกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์ เนื่องจากมีผลกระทบของการยึดที่ปลายด้านบนและด้านล่างของคอนกรีตในระหว่าง การทดสอบน้อยกว่า

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน โดยมุ่งประเด็นไปที่การผลิตคอนกรีตพูนให้มีกำลังอัดและการระบายน้ำที่ดี

มัลลิกา เสนาวงศ์ และคณะ (2553) ได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตพูนจากหินปูน โดยหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตพูน จากการศึกษาพบว่า ค่าการไหลของคอนกรีตพูนจะ



เพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยการไหลที่ดีและเหมาะสมสำหรับการทำคอนกรีตพูนจะเท่ากับ 190 มม. และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.29 นอกจากนั้นพบว่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความพูนที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนจะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และกำลังอัดของคอนกรีตพูนมีค่าสูงสุดที่ความพูนเท่ากับร้อยละ 15

กัญญาภัก จอดนอก และคณะ (2554) ได้ศึกษาความต้านทานการขีดสีและสึกกร่อนของคอนกรีตพูนสองชั้นที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดที่ข้างตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ที่อัตราส่วนโพรงร้อยละ 25 ที่อายุการบ่มน้ำ 7 วัน และบ่มในอากาศ 7 วัน ปูทับด้วยกรวดแม่น้ำล้างคัดขนาดเบอร์ 1 (2.36 มิลลิเมตร) และเบอร์ 2 (4.75 มิลลิเมตร) โดยใช้ปริมาณอัตราส่วนของเรซินต่อฮาร์ดเดินเนอร์ที่ 1:0.25, 1:0.50, 1:0.75 และ 1:1 จากผลการศึกษาพบว่า ร้อยละการสูญเสียและร้อยละการแตกหักแปรผันตรงกับขนาดของกรวดแม่น้ำล้างคัดขนาด โดยกรวดขนาดเล็กให้ค่าร้อยละการสูญเสียและค่าร้อยละการแตกหักน้อยกว่ากรวดขนาดใหญ่ ความแตกต่างระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียและค่าร้อยละการแตกหักของคอนกรีตพูนทั้งแบบที่บ่มในอากาศและแบบบ่มในน้ำมีค่าน้อยมาก

นันทวุฒิ อัครสันตติ และคณะ (2550) ได้ศึกษาคุณสมบัติคุณสมบัติของคอนกรีตพูนเพื่อใช้ป้องกันการชะล้างหน้าดินร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก จากการศึกษาได้ทำการควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 และในการผสมซีเมนต์เพสต์ได้ผสมด้วยเครื่องผสมที่รอบความเร็วสูง จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่อัตราส่วนโพรงร้อยละ 15, 20 และ 25 มีความสามารถในการไหลผ่านของน้ำ เพิ่มขึ้นตามปริมาตรของโพรงที่ต่อเนื่องกัน กำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตพูนจะลดลงเมื่ออัตราส่วนโพรงในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น และพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตพูน

ยุวดี หิริญ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาร่วมผสมของคอนกรีตสำหรับผลิตบล็อกปูผิวทางที่ระบายน้ำได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสม และชนิดของหินที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตระบายน้ำได้ เพื่อใช้ในการทำบล็อกปูถนนเพื่อก่อสร้างลานจอดรถหรือทางเดินเท้าในเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เพื่อลดการก่อสร้างพื้นที่ที่บึงน้ำ ทำให้น้ำผิวดินสามารถไหลซึมผ่านผิวลงสู่ชั้นดินได้ ช่วยลดปัญหาเรื่องการระบายน้ำและปัญหาน้ำท่วมการไหลนองของน้ำฝนได้ โดยได้ทำการศึกษาคูสมบัติด้านกำลังอัดและความชื้นน้ำของส่วนผสมคอนกรีตที่ทำจากหินเกล็ดและหินกรวดที่มีขนาดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 4 และเบอร์ 8 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ใช้หินกรวดที่มีขนาดละเอียดและมีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักหินมีค่าความชื้นน้ำของคอนกรีตเหมาะสมกับค่าความชื้นน้ำของดินในเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร และมีกำลังอัดเฉลี่ย 242 กก/ซม<sup>2</sup>.

๖๖๖.๘๙๓

๖๕๕๗.๕

๖.๔

354926

ในส่วนของจีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสารผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งพบครั้งแรกโดย ดร. Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ นิยามของจีโอพอลิเมอร์ กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davitodovits ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางธรณีเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่รูปอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมิเนียมมากระตุ้นด้วยต่าง กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์ แตกต่างกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าถ่านหินซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแกลบ เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แร่ดินเบาจากพื้นที่ภาคเหนือ และดินขาวจากพื้นที่บริเวณจังหวัดระนอง เป็นต้น โดยในประเทศไทยวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุและนักวิจัยด้านคอนกรีตมากขึ้น ฉะนั้นแล้วมีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการศึกษา และมุ่งประเด็นไปที่ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการก่อตัวและการรับแรงเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์หรือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมจากเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง ในช่วงอัตราส่วนผสมโดยโมลดังนี้  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.2 - 0.48$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.3 - 4.5$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 10 - 25$  และ  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.8 - 1.2$  โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิ  $65^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง Optical Microscope (OM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่เป็นอัตราส่วนผสมต่างกัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัสดุ โดยจะเห็นเม็ดเจลเกิดการก่อตัวรอบๆเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ขึ้น ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 56 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง

พร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูล และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เมื่อใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน โดยการเจาะรูตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด  $15 \times 15 \times 15$  ซม. ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร จนทะลุผ่าน จากนั้นใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ฟังลงไปนคอนกรีตเป็นระยะ 150 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นตัวเชื่อมประสานบริเวณรูเจาะ จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้จะมีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซิลิกาฟูมและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่าง

ทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ผลที่ได้พบว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมได้ โดยแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 79 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน

สมิตร ส่งพิริยะกิจ, วรเชษฐ ป้อมเชียงพิณ (2552) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 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 ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 161 กก./ชม.<sup>2</sup> และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงมีกำลังอัดเท่ากับ 329 กก./ชม.<sup>2</sup> จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้านหินลงก็จะได้กำลังอัดที่สูงขึ้นเช่นกัน

วิเชียร ชาลี และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านเตา โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านเตาที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ 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 35 เมกะปาสคาล และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ค่อนข้างชัดเจน

Songpiriyakij et al., 2010 ได้ศึกษาเกี่ยวกับ กำลังอัด และระดับปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพบว่า เถ้านเคลือบเปลือกไม้สามารถให้ ซิลิกาที่ดีในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ Si/Al ที่มีค่าสูง โดยใช้

ร่วมกับเต้าถ่านหิน และค่า Si/Al ที่ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุดคือ 8 ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.9$ ) นอกจากนั้นพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อ  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  และ  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่าสูงขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตพูนได้ อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ ยังไม่มีมาตรฐานที่รองรับการทดสอบเหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตพูนที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

## บทที่ 3

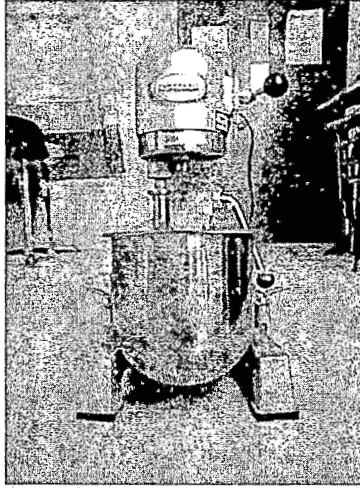
### วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

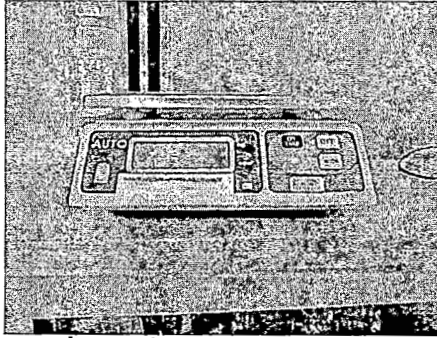
1.  $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$  : สารละลายโซเดียมซิลิเกต ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$
2.  $\text{NaOH}$  : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด
3. แก้วถ่านหิน : จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23
4. หิน : ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 3 ขนาด คือ หิน  $3/8''$  (S) หิน  $1/2''$  (M) และหิน  $3/4''$  (L) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70
5. น้ำ : ใช้น้ำสะอาดในการทดลอง

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

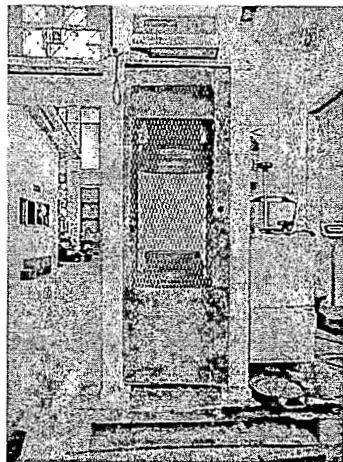
1. เครื่องผสมมอร์ต้าร์ (รูปที่ 3.1 เครื่องผสมมอร์ต้าร์)
2. เครื่องชั่งตวงวัด 3 ตำแหน่ง (รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งตวงวัด 3 ตำแหน่ง)
3. เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression machine) ขนาด 300 ตัน ยี่ห้อ ELE (รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด)
4. แบบหล่อปริมาตรทรงลูกบาศก์แบบเหล็ก สำหรับทดสอบกำลังอัดขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม<sup>3</sup> (รูปที่ 3.4 แบบหล่อปริมาตรทรงลูกบาศก์แบบเหล็ก)
5. แบบทดสอบความพรุนการซึมผ่านน้ำ
6. แผ่นพลาสติกสำหรับบ่มคอนกรีต
7. ปีกเกอร์ หลอดทดลอง
8. ถังมือยาง



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมมอร์ตาร์ท



รูปที่ 3.2 เครื่องข่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.4 แบบหล่อปริมาตรทรงลูกบาศก์แบบเหล็ก

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลาย

##### 3.3.1.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 480.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

##### 3.3.1.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 560.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

##### 3.3.1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 640.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

##### 3.3.1.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 14 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 720.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์

#### 3.3.2 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

การผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนได้ใช้เก้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งหมด โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเก้าถ่านหิน และมวลรวมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังนั้น การทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 12 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

ลำดับที่	ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน กก/ลบ.ม						
		Fly Ash	หิน (กก)				NaOH	Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>3</sub>
		(FA, กก.)	3/8"	1/2"	3/4"	หินฝุ่น	(กก.)	(กก.)
1	8M-S	386	1350			550	84	167
2	8M-M	386		1350		550	84	167
3	8M-L	386			1350	550	84	167
4	10M-S	386	1350			550	84	167
5	10M-M	386		1350		550	84	167
6	10M-L	386			1350	550	84	167
7	12M-S	386	1350			550	84	167
8	12M-M	386		1350		550	84	167
9	12M-L	386			1350	550	84	167
10	14M-S	386	1350			550	84	167
11	14M-M	386		1350		550	84	167
12	14M-L	386			1350	550	84	167

หมายเหตุ การใช้สัญลักษณ์ในงานวิจัยนี้

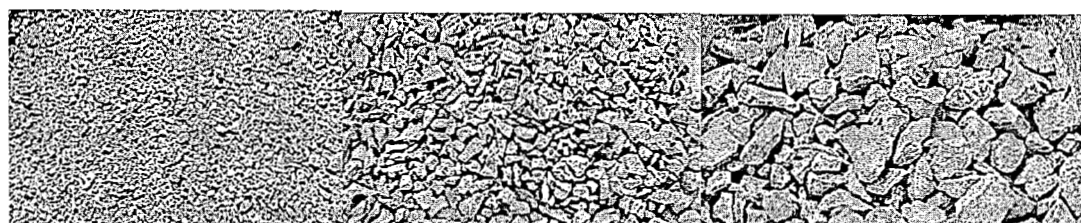
ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

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



### 3.3.3 การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคอนกรีตพูน

การศึกษานี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่เท่ากับ 1.98 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 3.1 ทำการผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทั้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงชั่งสารละลายที่เตรียมไว้ จากนั้นเทสารละลายที่ชั่งเตรียมไว้ผสมกับสารตั้งต้นให้เข้ากัน แล้วจึงใส่หินผสมด้วยเครื่องผสม เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงเทจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนลงแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แกะแบบและบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศโดยใช้พลาสติกใสพันรอบไว้ ทำการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นที่อายุ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบความพูนที่อายุ 28 วัน โดยรูปที่ 3.5 ถึง 3.8 แสดงการเตรียมตัวอย่างและบ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ในการทดลอง

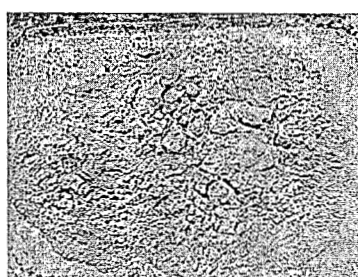


(ก) หินขนาด 3/8'' (S)

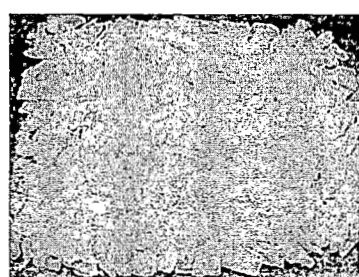
(ข) หินขนาด 1/2'' (M)

(ค) หินขนาด 3/4'' (L)

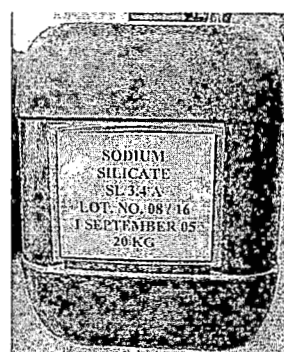
รูปที่ 3.5 มวลรวมที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคอนกรีตพูน



(ก) เถ้าถ่านหิน



(ข) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

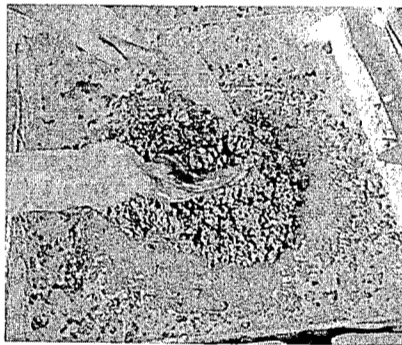


(ค) สารละลายโซเดียมซิลิเกต

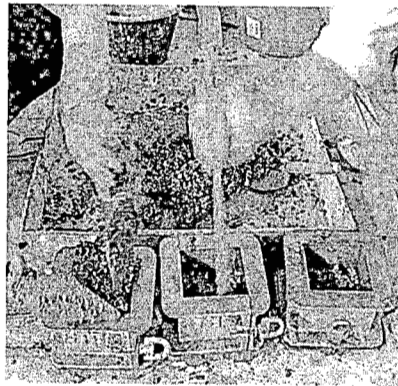
รูปที่ 3.6 วัสดุที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคอนกรีตพูน



(ก) การชั่งวัสดุและสารละลายที่เตรียมไว้



(ข) ผสมจีโอ โพลีเมอร์คอนกรีตพูน



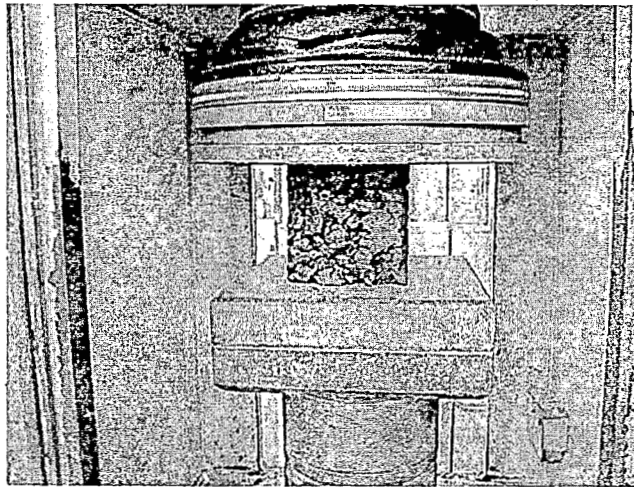
(ค) กระทบหรือเขย่าคอนกรีตให้แน่น และตกแต่งผิวหน้าให้เรียบ  
รูปที่ 3.7 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน



รูปที่ 3.8 การบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศ

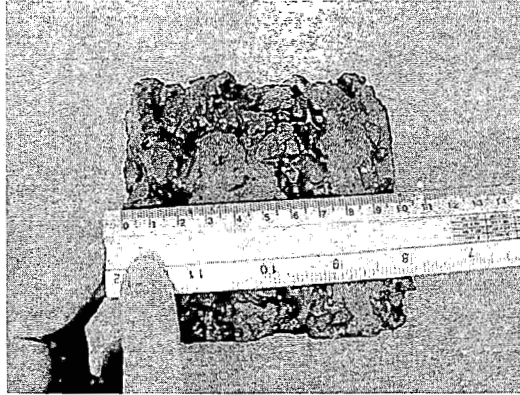
### 3.3.4 การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน

3.3.4.1 การทดสอบกำลังอัดโดยนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม<sup>3</sup> ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 3.9



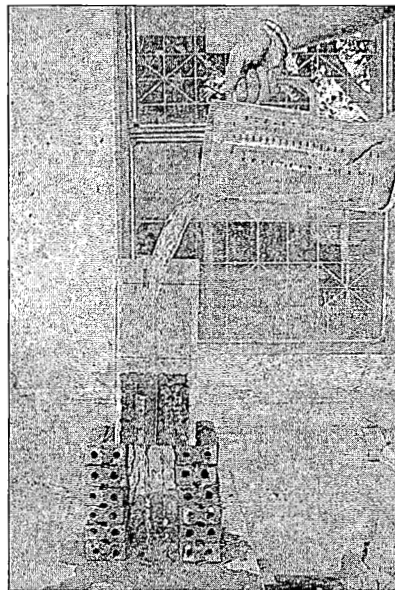
รูปที่ 3.9 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน

3.3.4.2 หาความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนโดยใช้ตัวอย่างขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม<sup>3</sup> วัดขนาด และชั่งน้ำหนักตัวอย่าง ทดสอบเพื่อกำหนดหาความหนาแน่น จากน้ำหนักหารด้วยปริมาตร โดยวัดความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 การหาความหนาแน่นของอีโพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

3.3.4.3 ทดสอบการซึมผ่านน้ำ ทดสอบการซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน โดยประกอบตัวอย่างอีโพอลิเมอร์คอนกรีตพูนกับแบบอะคริลิก และผ่านน้ำในตัวอย่างคอนกรีต โดยจับเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่าง ทดสอบในปริมาณที่กำหนด (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 อัตราการไหลของน้ำในอีโพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา และคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ได้แก่ กำลังอัด และความหนาแน่นที่อายุ 3, 14, และ 28 วัน และการซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน ตลอดจนคำนวณปริมาณอากาศในคอนกรีตพูนตามมาตรฐาน ASTM C138

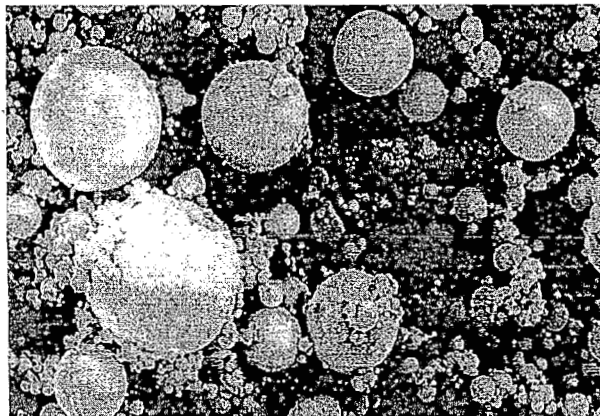
#### 4.1 สมบัติของวัสดุในการทดสอบ

##### 4.1.1 สมบัติของเถ้าถ่านหิน

(ก) สมบัติทางกายภาพ

- รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินมีสีน้ำตาลแดงและมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าถ่านหินจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.1 เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีทรงกลมและผิวเรียบ และเถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ที่เกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

- ขนาดและความละเอียด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน โดยความละเอียดของเถ้า

ถ่านหินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาโดยถ่านหินที่มีความละเอียดสูงการพัฒนากำลังอัดในคอนกรีตจะเร็วขึ้น เพราะความละเอียดสูงก็หมายถึง มีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรท์เซชั่น

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านหินแม่เมาะ

คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหินแม่เมาะ	
Specific Gravity	2.23
Retained on Sive No. 325 (%)	2.23
Median Particle Size (micron)	30.4

(ข) คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เมื่อรวมตัวกันกับสารประกอบอื่นที่เจือต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงของซีโพลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแม่เมาะ	
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, $\text{CaO}$	18.75
Magnesium Oxide, $\text{MgO}$	0.00
Sodium Oxide, $\text{Na}_2\text{O}$	0.00
Potassium Oxide, $\text{K}_2\text{O}$	2.38
Sulfur Trioxide, $\text{SO}_3$	2.21
Loss On Ignition, LOI	0.11

#### 4.1.2 สมบัติของมวลรวม

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 9.5, 12 และ 19 มม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127-88 และ C128-93 โดยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.72

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของมวลรวม

การทดสอบ	มวลรวมหยาบ
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.72
Apparent Specific Gravity	2.74
Absorption (%)	0.43

#### 4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

##### 4.2.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

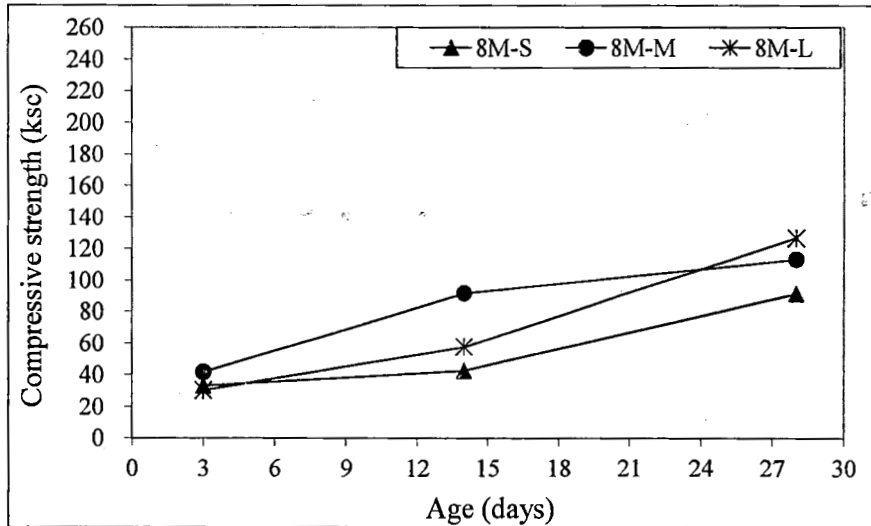
กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และขนาดมวลรวมหยาบต่างกันแสดงดังตารางที่ 4.4 โดยรูปที่ 4.2(ก) และ 4.2 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน หลังบ่มในอากาศเป็นเวลา 3, 14 และ 28 วัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 และ 14 โมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (8 โมลาร์) และมีความเข้มข้นสูง (14 โมลาร์) ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางเดียวกันคือ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาที่บ่มในอากาศ การที่กกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีการพัฒนาสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนั้นพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไซค์ที่มีความเข้มข้นสูง (รูปที่ 4.2 (จ)) มีแนวโน้มมากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายไซค์เดียวไฮดรอกไซค์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (รูปที่ 4.2 (ก)) การที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายไซค์เดียวไฮดรอกไซค์สูงขึ้น อาจเป็นเพราะสารละลายไซค์เดียวไฮดรอกไซค์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินออกมาก และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่ทำให้เพสต์มีความแข็งแรงและยึดเกาะกับมวลรวมได้แน่น (Chindaprasit et al., 2009; Klabprasit et al., 2008; Sanawong et al., 2010) จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังอัดมากขึ้นตามอายุที่บ่มในอากาศ

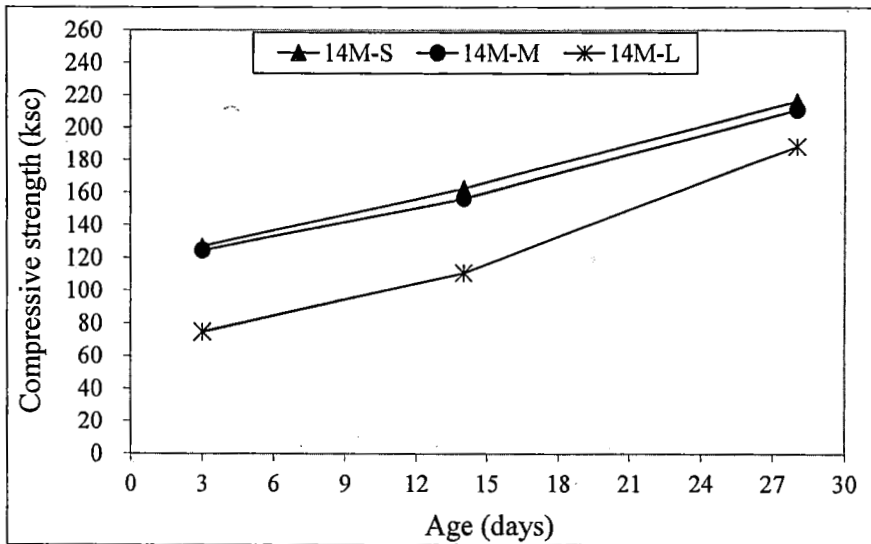
ตารางที่ 4.4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

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





ก) Na(OH) เข้มข้น 8 โมลาร์



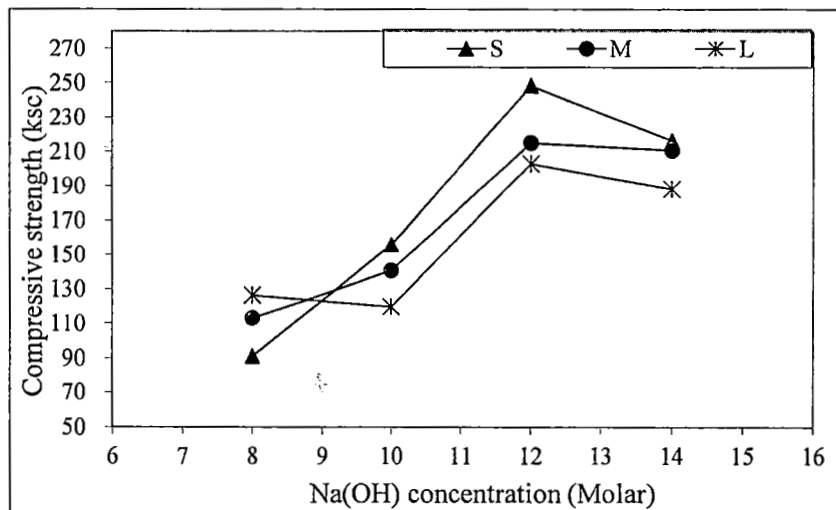
ข) Na(OH) เข้มข้น 14 โมลาร์

รูปที่ 4.2 ผลของ Na(OH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

#### 4.2.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ดังรูปที่ 4.3 พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Sanawong et al., 2010; Sanawong et al., 2010) ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย แต่พบว่ากำลังอัดมีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ ซึ่งมี

แนวโน้มทิศทางเดียวกันในทุกขนาดของมวลรวมหยาบ เช่น จีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ และใช้มวลรวมหยาบขนาด 3/8" (S) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 91.1, 155.9, 248.3 และ 216.3 กก./ $\text{cm}^2$  ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ทำให้จีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงที่สุด โดยที่ขนาดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 248.3, 215.0 และ 203.0 กก./ $\text{cm}^2$  ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ให้กำลังอัดต่ำสุด โดยที่ขนาดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 91.1, 113.1 และ 126.5 กก./ $\text{cm}^2$  ตามลำดับ การที่ กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 14 โมลาร์ อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความเข้มข้นมากไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น (Sanawong et al., 2010) อาจส่งผลต่อการยึดเกาะของจีโพลิเมอร์เจลกับมวลรวมในคอนกรีตลดลงได้

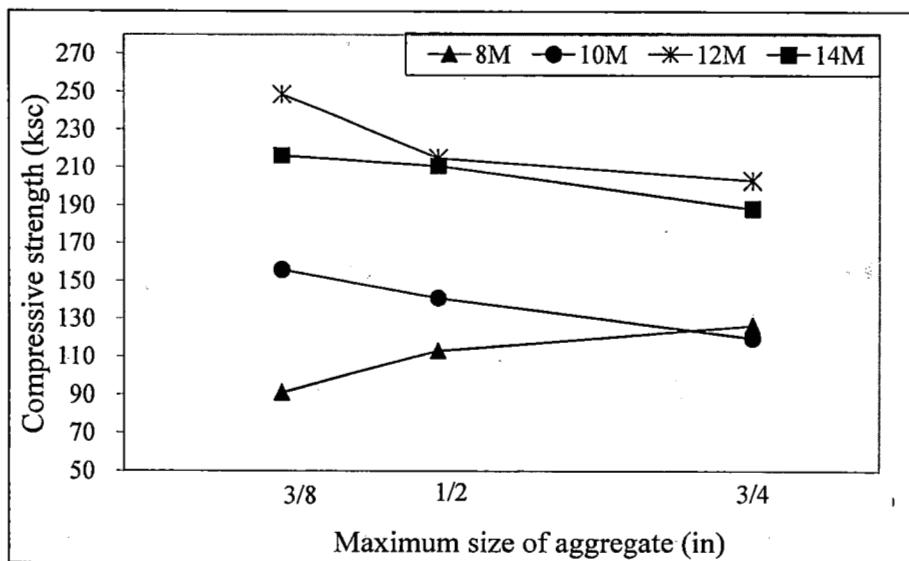


รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน

#### 4.2.3 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูน

เมื่อพิจารณาผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ขนาดมวลรวมหยาบที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ขณะที่การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (8 โมลาร์) กลับพบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ให้กำลังอัดเมื่อใช้ขนาดของมวลรวมหยาบ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) เท่ากับ 216.3, 210.8 และ 188.3 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ขณะที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนในกลุ่มเดียวกัน เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์มีกำลังอัดเท่ากับ 91.1, 113.1 และ 126.5 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้ขนาดของมวลรวมหยาบที่ละเอียดขึ้นในจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นมากขึ้น) ส่งผลดีต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ซึ่งอาจเกิดจากมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลงมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ยึดเกาะระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมได้แข็งแรงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดที่สูงขึ้น ส่วนในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำ พบว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์จะมีความแข็งแรงต่ำลง การใช้มวลรวมที่ละเอียดขึ้น อาจไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ซึ่งสอดคล้องกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปที่พบว่า ขนาดของมวลรวมหยาบที่ละเอียดมากขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตกำลังสูงมากกว่าคอนกรีตกำลังต่ำ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)



รูปที่ 4.4 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน

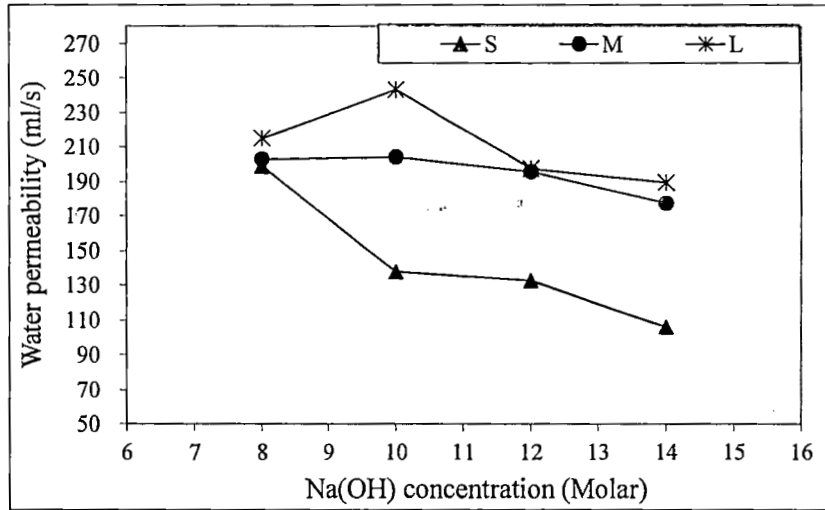
### 4.3 อัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเส้นกราฟที่ 4.5 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนต่ำลง และให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันในมวลรวมหยาบทั้ง 3 ขนาด เช่น การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็ก (S) ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ให้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 198.8, 137.6, 132.5 และ 105.8 มล/วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีกำลังอัดที่ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง จึงทำให้ความพรุนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีน้อยลง และส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำต่ำลงด้วย (Sanawong et al., 2010) นอกจากนี้พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น มีผลต่อการลดอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่ เช่น การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 โมลาร์เป็น 14 โมลาร์ พบว่า อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็ก (S) ลดลงเท่ากับ 93 มล/วินาที (ลดจาก 198.8 มล/วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 8 โมลาร์เป็น 105.8 มล/วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นที่ 14 โมลาร์) ขณะที่การใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (L) ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำลดลงเท่ากับ 25.5 มล/วินาที (ลดจาก 214.9 มล./วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 8 โมลาร์เป็น 189.4 มล/วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 14 โมลาร์) ผลดังกล่าวอาจเกิดจากมวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะได้ดีกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ จึงมีผลให้อัตราการไหลของน้ำของคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก ขึ้นกับสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มากกว่าคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงขึ้น จึงมีผลทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์แข็งแรงมากขึ้น จึงส่งผลให้ลดอัตราการไหลของน้ำในคอนกรีตพรุนลงได้ โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา (Chindaprasirt et al., 2009) ที่พบว่า การลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตพรุนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามความพรุนที่มากขึ้น มีผลชัดเจนในคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่

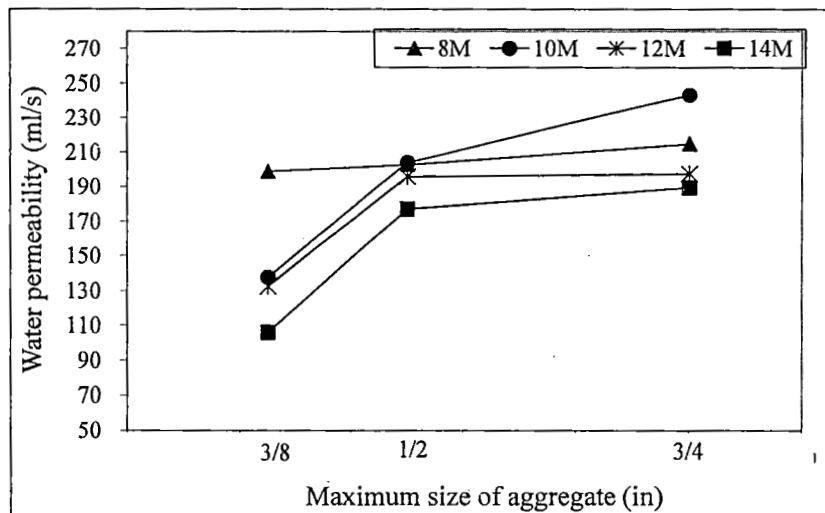
รูปที่ 4.6 แสดงผลของขนาดมวลรวมหยาบต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากถ้ำถ่านหิน พบว่า มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนเพิ่มมากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้มวลรวมหยาบขนาด S, M และ L มีอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 105.8, 177.2 และ 189.4 มล/วินาที ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากขนาดของช่องว่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพศกับมวลรวมขนาดใหญ่ มีมากกว่ามวลรวมขนาดเล็ก จึงส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.5 อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	อัตราการไหลของน้ำ (มล/วินาที)
8M-S	198.8
8M-M	198.8
8M-L	214.9
10M-S	198.8
10M-M	204
10M-L	243.1
12M-S	243.1
12M-M	214.9
12M-L	198.8
14M-S	214.9
14M-M	214.9
14M-L	214.9



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.6 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน

4.4 ปริมาณอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

การศึกษาครั้งนี้ได้คำนวณหาร้อยละปริมาณอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ตามมาตรฐาน ASTM C138 ดังสมการที่ 4.1 ดังนี้ ร้อยละของปริมาณอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน แสดงดังตารางที่ 4.6

$$A(\%) = \left[ \frac{(T-D)}{T} \right] \times 100 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

เมื่อ  $A (\%) =$  ค่าร้อยละของปริมาณฟองอากาศ

$$D = \frac{M}{V} \text{ คือ ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่ได้จากก้อนตัวอย่าง}$$

$T =$  ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตตามทฤษฎีที่ไม่รวมอากาศ

ตารางที่ 4.6 ร้อยละปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน

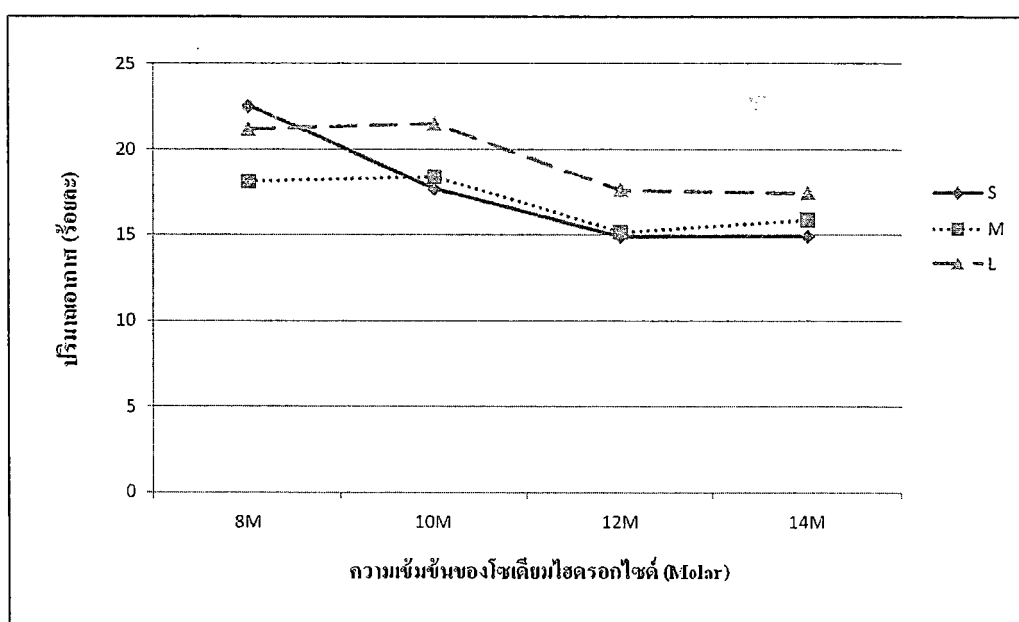
ส่วนผสม	ปริมาณอากาศ (ร้อยละ)
8M-S	22.57
8M-M	18.09
8M-L	22.57
10M-S	22.57
10M-M	22.57
10M-S	21.5
10M-S	18.09
10M-M	18.09
12M-L	21.5
12M-L	22.57
10M-M	22.57
14M-L	22.57

#### 4.4.1 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละปริมาณอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้านหิน แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่า เมื่อใช้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีแนวโน้มต่ำลง เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็ก(S) และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มีปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนเท่ากับร้อยละ 22.57, 17.65, 14.87 และ 14.91 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นเพราะความ

เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกา (Si) และ อะลูมินา (Al) จากเส้น ถ่านหิน ได้มาก และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ทำให้เพสต์มีความแข็งแรง และยึดเกาะ กับมวลรวมได้แน่น มีช่องว่างในเนื้อคอนกรีตน้อยลง จึงทำให้ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตลดลง

ปริมาณอากาศในคอนกรีตแสดงถึงความพรุนของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยคอนกรีตที่มีปริมาณอากาศสูง แสดงว่ามีช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมากซึ่งหมายถึงคอนกรีตมีความพรุนมาก และผล การศึกษาในครั้งนี้สามารถยืนยันความสอดคล้องระหว่างปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน กับการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน



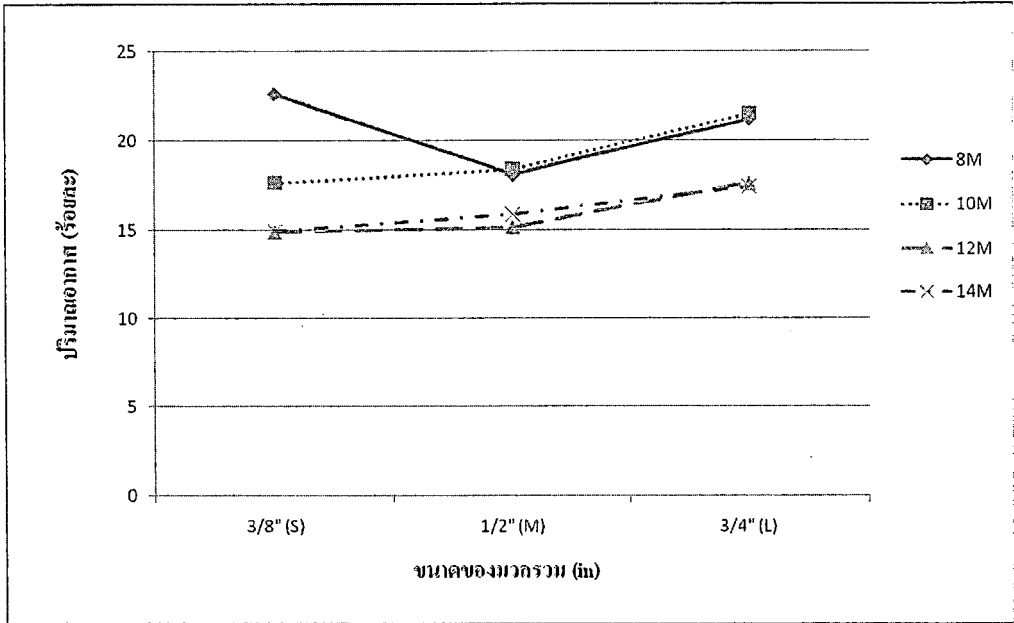
รูปที่ 4.7 ผลความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการปริมาณอากาศของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตพรุนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน

#### 4.4.2 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อปริมาณอากาศของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

เมื่อพิจารณาผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ดัง รูปที่ 4.8 พบว่า ให้ผลการทดสอบสอดคล้องกับการซึมผ่านน้ำกล่าวคือ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ ได้จากมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมี แนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากขนาดช่องว่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ของก้อนตัวอย่าง ในมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (L) มีช่องว่างที่ใหญ่ ส่งผลให้มีปริมาณอากาศมาก แต่ในมวลรวมหยาบ



ขนาดเล็ก (S) มีช่องว่างที่เล็ก ส่งผลให้ปริมาณน้อย เช่น จีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 14 โมลาร์และใช้มวลรวมหยาบขนาด เล็ก(S), กลาง(M) และ ใหญ่ (L) มีปริมาณอากาศในจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนเท่ากับร้อยละ 14.91, 15.87 และ 17.42 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อปริมาณอากาศในจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน

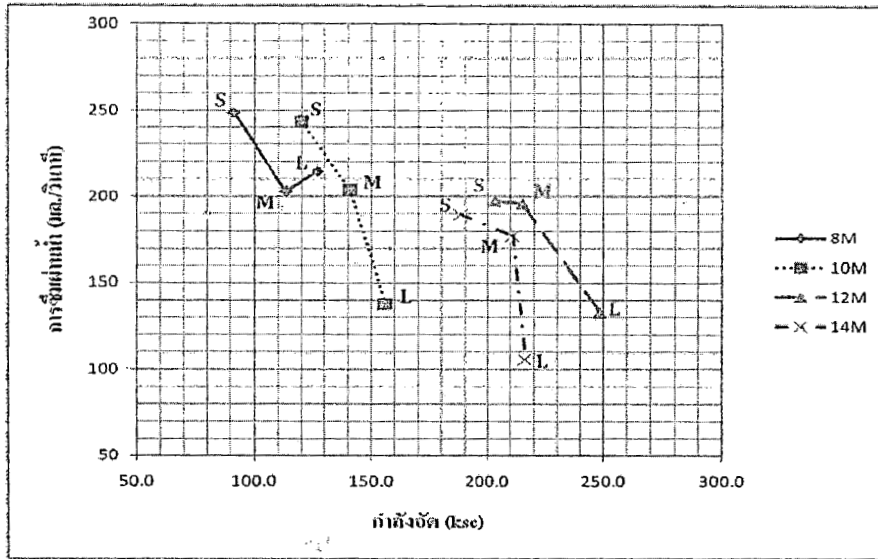
#### 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำ ปริมาณอากาศ และกำลังอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูน

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล(กำลังอัด) และคุณสมบัติด้านความพรุน (การซึมผ่านน้ำ และปริมาณอากาศในคอนกรีต) มีประโยชน์ในการพิจารณาคุณสมบัติของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่เหมาะสม เพื่อใช้งานภายใต้คอนกรีตที่มีความพรุนสูง และมีการรับแรงเชิงกลที่ดีควบคู่กัน ไป โดยทั่วไปคอนกรีตพูนที่ดีจะต้องมีความพรุนสูง ควบคู่กับกำลังอัดที่สูงด้วย แต่ส่วนใหญ่คอนกรีตที่มีความพรุนสูงมักจะมีกำลังอัดต่ำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาควบคู่กันไประหว่างความพรุนของคอนกรีต กับกำลังรับแรงเชิงกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานได้เหมาะสมตามลักษณะงานก่อสร้างต่อไป

#### 4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับการซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และการซึมผ่านน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนดังรูปที่ 4.9 พบว่า การซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทุกกลุ่ม เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ ที่มีกำลังอัด 155.9, 140.8 และ 119.8 กก./ซม<sup>2</sup> มีการซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 137.6, 204.0 และ 243.1 มล./วินาทีตามลำดับ

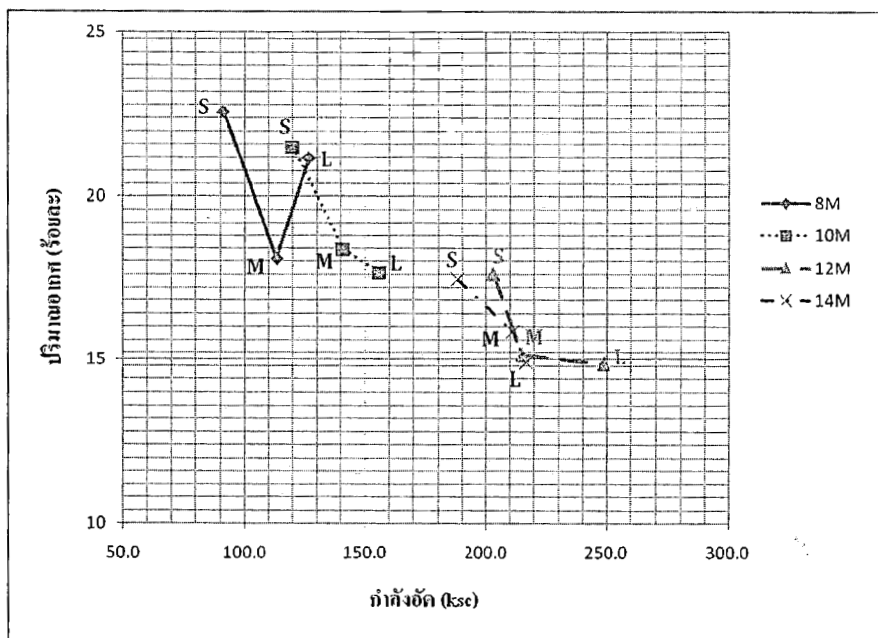
การที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น และการซึมผ่านน้ำที่ลดลงทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ทำให้เปสต์มีความแข็งแรง และเจลที่เป็นของแข็งที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยามีมากขึ้น จึงทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น แต่ช่องว่างในคอนกรีตลดลง ซึ่งส่งผลให้การซึมผ่านที่ลดลงไปด้วย นอกจากนั้นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่มีกำลังอัดสูง จะมีความหนาแน่นสูงตามไปด้วย (ตารางที่ 4.4) และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีช่องว่างระหว่างรูพรุนน้อยลง ทำให้ปริมาณน้ำที่จะซึมผ่านได้ผ่านได้น้อยลงด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่มีกำลังอัดสูง มีความสามารถการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่มีกำลังอัดต่ำกว่า เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.12 จะสังเกตได้ว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 12 โมลาร์ มีความเหมาะสมเพื่อที่จะใช้งานมากที่สุด เนื่องจากให้กำลังอัดที่สูงควบคู่ กับการซึมผ่านน้ำที่สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน เช่น ที่ความพรุนที่เท่ากันประมาณ 150 มล./วินาที จากกราฟพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 12 และ 14 โมลาร์ให้กำลังอัดประมาณ 155, 240 และ 215 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ถึงแม้จะมีการซึมผ่านน้ำสูงแต่พบว่ามีกำลังอัดค่อนข้างต่ำ โดยพบว่าทุกกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันต่ำกว่า 126 กก./ซม<sup>2</sup> ซึ่งอาจจะเหมาะสมในการใช้งานก่อสร้างที่ไม่ต้องการกำลังสูงแต่ต้องการความพรุนมาก เช่น งานบล็อคลูพื้นทางเดิน, บล็อกตกแต่งสวน เป็นต้น



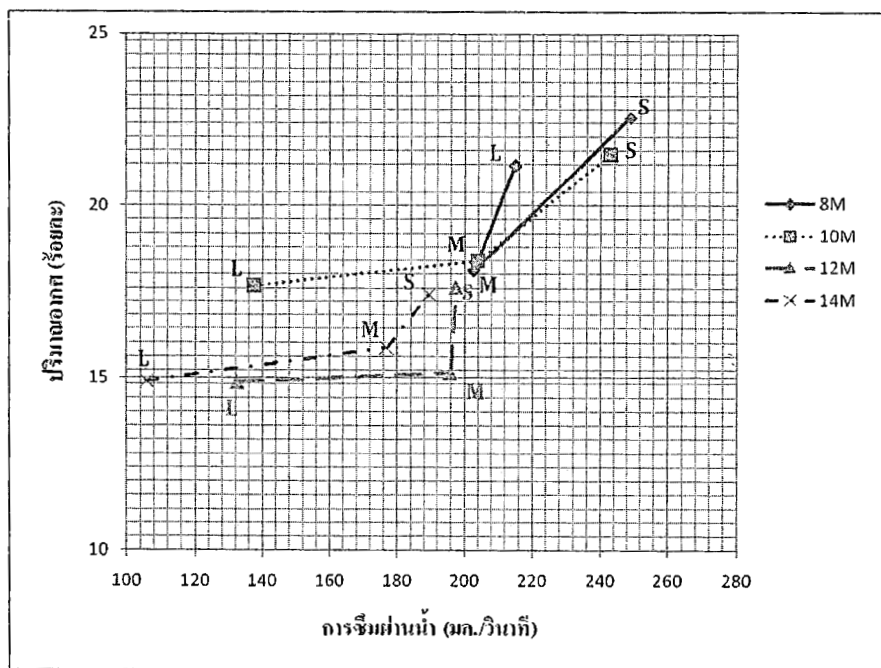
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับค่าการซึมผ่านของน้ำของอีโพลีเมอร์คอนกรีตพูนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน

#### 4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กับปริมาณอากาศของอีโพลีเมอร์คอนกรีตพูน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณอากาศในอีโพลีเมอร์คอนกรีตพูน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำ กล่าวคือกำลังอัดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณอากาศลดลง ซึ่งเป็นการยืนยันความพูนในคอนกรีตให้ชัดเจนมากขึ้น ปริมาณอากาศในคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ความพูนในคอนกรีตที่สามารถคำนวณได้ง่าย และทำให้การทดสอบทำได้สะดวก รวดเร็ว เพราะใช้วิธีการวัดน้ำหนักและปริมาตรคอนกรีตตามวิธีของ ASTM C138 โดยความสอดคล้องระหว่างปริมาณอากาศในอีโพลีเมอร์คอนกรีตพูนกับการซึมผ่านน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งพบว่า การซึมผ่านน้ำที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณอากาศในอีโพลีเมอร์คอนกรีตพูนมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันความพูนในคอนกรีตที่วัดจาก 2 วิธี ที่ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงเป็นการยืนยันว่า การวัดความพูนในคอนกรีตโดยวิธีง่าย (คำนวณปริมาณอากาศในคอนกรีต) สามารถใช้เป็นข้อมูลที่แสดงความพูนในคอนกรีตได้ดี และสอดคล้องกับผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำในอีโพลีเมอร์คอนกรีตพูนที่เป็นวิธีที่ยากกว่า ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันการทดสอบที่ใช้วิธีการที่ง่าย สะดวก และรวดเร็ว เพื่อเป็นตัวแทนของการทดสอบที่ยากได้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าร้อยละปริมาณอากาศของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศกับการซึมผ่านน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังบ่มในอากาศที่อายุ 28 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาศาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงที่สุด

5.1.2) การใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงขึ้น และเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ

5.1.3) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่าสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ มีค่าอัตราการไหลของน้ำมากที่สุด

5.1.4) การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงมีผลต่อการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่

5.1.5) การใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ขึ้นในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนเพิ่มมากขึ้น โดยการซึมผ่านของน้ำมีค่าสูงที่สุดในมวลรวมหยาบขนาด 3/4" (L) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์

5.1.6) ความสัมพันธ์ระหว่างความพูนที่วัด โดยการซึมผ่านน้ำและปริมาณอากาศในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ให้ตรงไปในทิศทางเดียวกันซึ่งสามารถใช้วิธีการวัดที่ง่าย (ปริมาณอากาศในคอนกรีต) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของความพูนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) ควรศึกษาการทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของเถ้าถ่านหิน

5.2.2) ควรศึกษาการทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์ม น้ำมัน เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

1. กัญญาภัค จอดนอก, ถนัดกิจ ชารีรัตน์, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, 2554. “การศึกษาความต้านทานการขจัดสีและสีกร่อนของคอนกรีตพูนสองชั้น”, การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, มหาวิทยาลัยมหิดล 18 – 20 พฤษภาคม 2554
2. นันทวุฒิ อัครสันตติกุล, ไพศาล ศิลาวัฒนาสกุล, เสรี ศรีงาม, 2550. “การศึกษาคอนกรีตพูนป้องกันการชะล้างน้ำดิน”, โครงการงานวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น
3. ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547, เถ๋าลอยในงานคอนกรีต, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย
4. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต, ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
5. พร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูล, 2551. “กำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นตัวประสาน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 พัทยา ชลบุรี
6. มัลลิกา เสนาวงศ์, วณิฎา แสงพยับ, สาวิตรี พบชัยภูมิ, 2553. “การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตพูน”, โครงการงานวิจัยระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
7. ยุวดี หิรัญ, พีรพงษ์ ศิวินา, สุรชาติ ราโชติ, 2550. “การศึกษาส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับผลิตบล็อกปูผิวทางระบายน้ำได้”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3 : MAT-145.
8. วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552. การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ่าก้นเตา. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 14 (1) : 47-55.
9. สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ ป้อมเชียงพิณ, 2552. “จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าก้นเตาแม่เมาะ”, การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1831-1836
10. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ่าก้นเตา. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 31 (2):371-381.
11. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี, 2548. “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ่าก้นเตา”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี
12. ASTM C 618-03 (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 04.02.

13. ASTM C 192 (2003). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Annual Book of ASTM Standards, 04.02.
14. ASTM C 617 (2003). Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 04.02.
15. ASTM C 318 (2003). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 04.02.
16. ASTM C127-12. (1997). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.
17. ASTM C 128-93 (1995). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 69-73.
18. BS 1881-116, 1983. Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes. British Standards Institution.
19. Chawakitchareon, P., Veasommai, C., 2012. "Effect of curing time on strength of geopolymer mortar incorporating silica waste", *The Journal of Industrial Technology* 8(3), pp. 52-60.
20. Chalee, W., Charoenprom, K., 2012. "Evaluation of sulfate resistance of fly ash-based geopolymer concrete", *KMUTT Research and Development Journal* 35(2), pp. 157-170.
21. Chindapasirt, P., Hatanaka, S., Mishima, N., Yuasa, Y., Chareerat T., 2009. "Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete", *Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 16, pp. 714-719.
22. Chindapasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., Yuasa Y., 2008. "Cement paste characteristics and porous concrete properties", *Construction and Building Materials* 22, pp. 894-901.
23. Chindapasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., Rattanasak, U., 2009. "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers", *Waste Management* 29, pp. 539-543.
24. Davidovits, J., 1999. Chemistry of geopolymer system, Terminology. pp 9–39. In *Proceeding of Second International Conference Geopolymer '99*, France.

25. Klabprasit, T., Jaturapitakkul C., Chalee, W., Chindaprasirt P., Songpiriyakij, S., 2008. "Influence of Si/Al ratio on compressive strength of rice husk-bark ashes and fly ash-based geopolymer paste", The 3rd ACF international conference ACF/VCA, pp. 151-157.
26. Lian C., Zhuge Y., Beecham, S., 2011. "The relationship between porosity and strength for porous concrete", *Construction and Building Materials* 25, pp. 4294-4298.
27. Paisitsrisawat, P., Rattanasak U., 2013. "Effect of silica fume on properties of fluidized combustion (FBC) fly ash geopolymer", *The Journal of Industrial Technology* 9(9), pp. 40-48.
28. Sanawong, C., Chalee, W., 2011. "Chloride penetration of fly ash-based geopolymer concrete under marine environment", *The Journal of KMUTNB* 21(2), pp. 257-265.
29. Sanawong, C., Chalee, W., 2010. "Water permeability in fly ash based geopolymer concrete", *J. of Civil engineering and architecture* 4, pp. 15-19.
30. Sanawong, C., Somna, K., Chalee, W., 2010. "Compressive and bond strengths of fly ash-based geopolymer concrete", *Burapha Sci.* 15(1), pp. 13-22.
31. 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* 24, pp.236-240
32. Temuujin, J., Riessen A. van, MacKenzie, KJD., 2010. "Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature", *Construction and Building Materials* 24, pp. 1906-1910.
33. Tongaroonsri, S., Lekauwsay, S., Nunpakde, V., Punyanak, O., 2011. "Development of porous light weight concrete block for green building", *The Journal of Industrial Technology* 7(2), pp. 22-30.



## ภาคผนวก ก

### ผลผลิต (Output)

#### บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) วิกนกเนตร ชีนนกคุ้ม วริศรา โกระวิโยธิน และ วิเชียร ชาลี, “ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (รอดอรับตีพิมพ์)

# ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากเถ้าถ่านหิน

## Effect of Na(OH) concentration on water flow rate and compressive strengths of fly ash-based geopolymer porous concrete

กนกเนตร ชื่นนัคคุ้ม<sup>1</sup> วริศรา โกรระวิโยธิน<sup>1</sup> และ วิเชียร ชาลี<sup>2\*</sup>

Kanoknet Kuennokkhum<sup>1</sup>, Warisara Koraviyothin<sup>1</sup> and Wichian Chalee<sup>2\*</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของขนาดมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อกำลังอัด และอัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนจากโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่าง Si/Al คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 3 ขนาด คือ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) หล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนทรงลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม.<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุป่มในอากาศ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบอัตราการไหลของน้ำในคอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้นแต่จะลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NaOH ลดลง นอกจากนี้พบว่า การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กลง ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นและอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนลดลง

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน, ความเข้มข้นของ NaOH, เถ้าถ่านหิน, กำลังอัด, อัตราการไหลของน้ำ

### Abstract

This research, the effect of size of coarse aggregate and sodium hydroxide (NaOH) concentrations on compressive strength and water flow rate of porous geopolymer concretes were studied. Geopolymer concrete were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The Si/Al ratio was kept constant and the concentration of NaOH was varied at 8, 10, 12, and 14 molar. The maximum size of coarse aggregate was varied as 3/8 (S), 1/2 (M) and 3/4 (L) - inch. The porous concrete cube specimens of  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  were cast for compressive strength test at 3, 14, and 28 days air cure and water flow rate of porous geopolymer concretes was also tested at 28 days. The results show that the compressive strength of porous geopolymer concrete increased with increase in NaOH concentration but a slight decrease of compressive strength was found when the NaOH concentration was up to 14 molar. The water flow rate of porous geopolymer concrete increased with the decrease of NaOH concentration. In addition, using the smaller size of coarse aggregate resulted in a higher compressive strength and lower water flow rate in porous geopolymer concrete.

**Keywords :** Geopolymer porous concrete, NaOH concentration, Fly ash, Compressive strength, Water flow rate

---

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

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

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

## 1. บทนำ

คอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่ไม่ใช้มวลรวมละเอียดซึ่งมีการพัฒนาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่รักษาสภาพแวดล้อม และนำมาใช้ในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น งานปูผิวถนน งานดาดคลองและพื้น ที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงอยู่ได้อากาศพืชและสัตว์ขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมอื่นๆ เช่น ใช้เป็นฉนวนความร้อน เป็นวัสดุช่วยเก็บเสียง วัสดุช่วยระบายน้ำ รวมทั้งโครงสร้างทางชลศาสตร์สำหรับกั้นคลื่นกระแทก เป็นต้น

การศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตพูน จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผ่านมา [1, 2] พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตพูนจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.20-0.25 โดยมีอัตราส่วนช่องว่างในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25 การใช้หินกรวดที่มีขนาดคละกั้นจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตพูนสูงขึ้นและให้ความพูนในระดับที่ใช้งานได้ดี โดยกำลังอัดของคอนกรีตพูนจะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ในคอนกรีตพูนที่มีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากัน การใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตพูนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้มวลรวมหยาบในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตพูนลดลง [3] การผลิตคอนกรีตพูนที่ดีจะต้องได้ส่วนผสมที่ทำให้คอนกรีตพูนมีกำลังอัดที่สูงภายใต้ความพูนที่สูงด้วย ซึ่งเป็นการยากที่จะผลิตคอนกรีตให้มัลักษณะดังกล่าว เนื่องจากคอนกรีตที่มีความพูนสูงมักจะมัลกำลังอัดต่ำลงอย่างชัดเจน [4] ดังนั้นแนวทางในการเลือกส่วนผสมเพื่อผลิตคอนกรีตพูนที่ดีควรพิจารณาจากกำลังอัดที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยให้ความพูนมากที่สุด

การศึกษาวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตเริ่มมีในประเทศไทยมากขึ้น [5-8] ทั้งนี้เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องของความเป็นวัสดุประสานได้โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่เป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแทน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ ตลอดจนเป็นแนวทางที่ส่งเสริมการลดมลพิษและสภาวะโลกร้อน ที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ได้ การผลิตวัสดุประสานที่เป็นจีโอพอลิเมอร์ เป็นการใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไล สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่ง

ปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มัลกำลังรับแรงได้ [9, 10] ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ สารปอซโซลานที่สามารถใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ ถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่านดินขาวเผา เป็นต้น นอกจากนั้น การศึกษาที่ผ่านมา [11] พบว่า การผสมซิลิกาฟุ่มในถ้ำถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ สามารถทำให้กำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการนำถ้ำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์อีกทางด้วย สำหรับประเทศไทยยังไม่มีโรงงานคอนกรีตที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขาดความมั่นใจในการนำมาใช้งาน เพราะฐานข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังมีไม่มากพอ ตลอดจนการใช้วัสดุประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังเป็นที่ยอมรับเนื่องจากสามารถก่อสร้างได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้ช่างที่มีความชำนาญสูงมาก ประกอบกับยังไม่เกิดปัญหาขาดแคลนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตาม แนวทางส่งเสริมเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างจริงจังในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ควรเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เป็นประโยชน์และเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานให้มากขึ้น โดยเริ่มจากการใช้งานก่อสร้างคอนกรีตที่ไม่มีความซับซ้อนมาก และมีลักษณะการรับแรงเชิงกลที่ไม่เสี่ยงต่อการวิบัติและก่อให้เกิดอันตราย ตลอดจนส่งเสริมให้มีการใช้งานในงานก่อสร้างคอนกรีตพื้นฐาน เช่น คอนกรีตพูน คอนกรีตบล็อกปูพื้น หรือวัสดุงานก่อผนัง เป็นต้น การเริ่มต้นใช้งานดังกล่าวจำเป็นต้องมีข้อมูลการวิจัยที่น่าเชื่อถือได้เป็นฐานข้อมูลประกอบ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการผลิตคอนกรีตพูนโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่ใช้ถ้ำถ่านหินในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน โดยมุ่งประเด็นไปที่ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และขนาดมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานได้ใช้ถ้ำถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [12] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 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 [12] โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนประกอบด้วย 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°C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 9.5 มม.(3/8"), 12.5 มม.(1/2") และ 19 มม. (3/4") ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C127 [13] แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 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, $\text{CaO}$	18.75
Magnesium Oxide, $\text{MgO}$	-
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

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

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

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

### 2.2.1 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

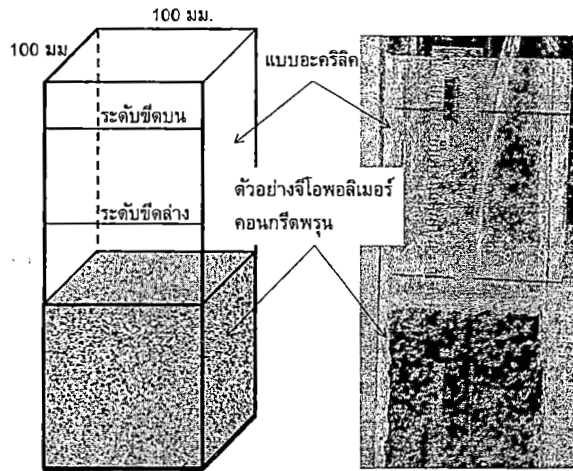
การศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยใช้อัตราส่วนของ Si/Al มีค่าคงที่ และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ มวลรวมใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 3 ขนาด ได้แก่ หิน 3/8" (S) หิน 1/2" (M) และหิน 3/4" (L) โดยส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนแสดงดังตารางที่ 3 ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบได้ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทั้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นผสมเถ้าถ่านหินให้เข้ากันกับสารที่เตรียมไว้ แล้วใส่มวลรวม โดยหล่อตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 มม<sup>3</sup> เพื่อทดสอบกำลังอัดโดยอ้างอิงกับมาตรฐาน BS 1881 [14] ซึ่งเป็นมาตรฐานในงานคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนในอากาศโดยใช้พลาสติกพันรอบ (ดังรูปที่ 1) จากนั้นทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุบ่มในอากาศ 3, 14, และ 28 วัน และทดสอบอัตราการไหลของน้ำที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 1 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่บ่มในอากาศ

### 2.2.2 การทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

ทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนโดยจับเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่างทดสอบในปริมาตรที่กำหนด (จากขีดระดับบนถึงระดับล่าง) ซึ่งสามารถหาการซึมผ่านน้ำในรูปของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน โดยคำนวณจากปริมาตรน้ำต่อเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่าง รูปที่ 2 แสดงการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (กก/ม <sup>3</sup> )					ความเข้มข้น ของ NaOH (โมลาร์)	
	เถ้าถ่าน หิน	หิน			NaOH		Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>3</sub>
		3/8"	1/2"	3/4"			
8M-S	386	1350			84	167	8
8M-M	386		1350		84	167	8
8M-L	386			1350	84	167	8
10M-S	386	1350			84	167	10
10M-M	386		1350		84	167	10
10M-L	386			1350	84	167	10
12M-S	386	1350			84	167	12
12M-M	386		1350		84	167	12
12M-L	386			1350	84	167	12
14M-S	386	1350			84	167	14
14M-M	386		1350		84	167	14
14M-L	386			1350	84	167	14

### 3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

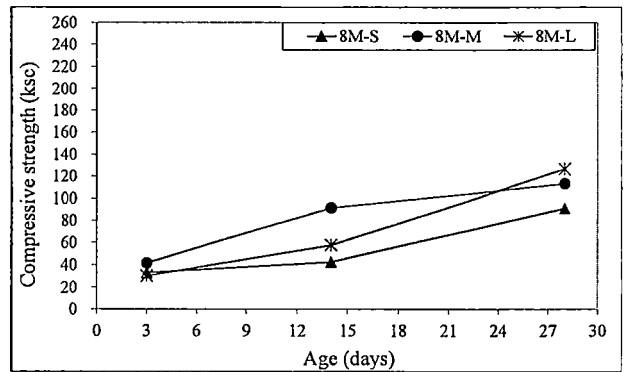
#### 3.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

##### 3.1.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

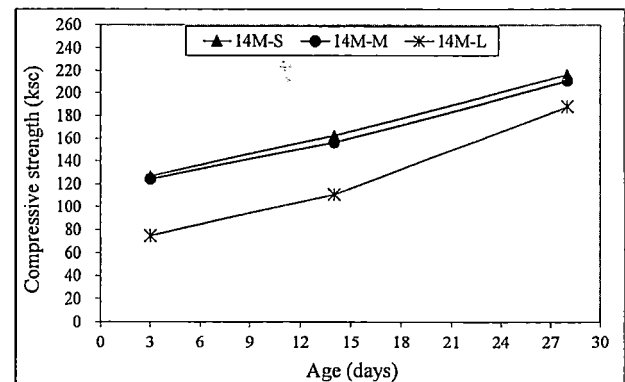
กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และขนาดมวลรวมหยาบต่างกันแสดงดังตารางที่ 4 โดยรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน หลังบ่มในอากาศเป็นเวลา 3, 14 และ 28 วัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8 และ 14 โมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (8 โมลาร์) และมีความเข้มข้นสูง (14 โมลาร์) ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางเดียวกันคือ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาที่บ่มในอากาศ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีการพัฒนาสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง (รูปที่ 4(ข)) มีแนวโน้มมากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (รูปที่ 4(ก)) การที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น อาจเป็นเพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเต้าถ่านหินออกมาก และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ที่ทำให้เฟสที่มีความแข็งแรงและยึดเกาะกับมวลรวมได้แน่น [7, 15, 16] จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีการพัฒนากำลังอัดมากขึ้นตามอายุที่บ่มในอากาศ

ตารางที่ 4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

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



ก) Na(OH) เข้มข้น 8 โมลาร์

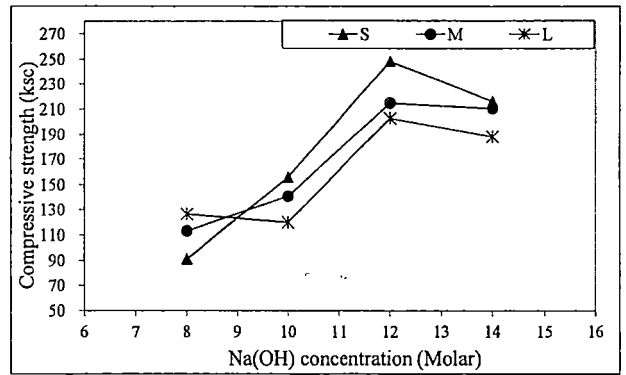


ข) Na(OH) เข้มข้น 14 โมลาร์

รูปที่ 3 ผลกระทบของ Na(OH) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน

### 3.1.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ดังรูปที่ 4 พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [16, 17] ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากแก้วด้านหินได้มากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงตามไปด้วย แต่พบว่ากำลังอัดมีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ ซึ่งมีแนวโน้มทิศทางเดียวกันในทุกขนาดของมวลรวมหยาบ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ และใช้มวลรวมหยาบขนาด 3/8" (S) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 91.1, 155.9, 248.3 และ 216.3 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดสูงที่สุด โดยที่ขนาดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 248.3, 215.0 และ 203.0 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ ให้กำลังอัดต่ำสุดโดยที่ขนาดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 91.1, 113.1 และ 126.5 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การที่กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 14 โมลาร์ อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความเข้มข้นมากไปและเหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อสัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะฉ่ำ [16] อาจส่งผลต่อการยึดเกาะของจีโอพอลิเมอร์เจลกับมวลรวมในคอนกรีตลดลงได้



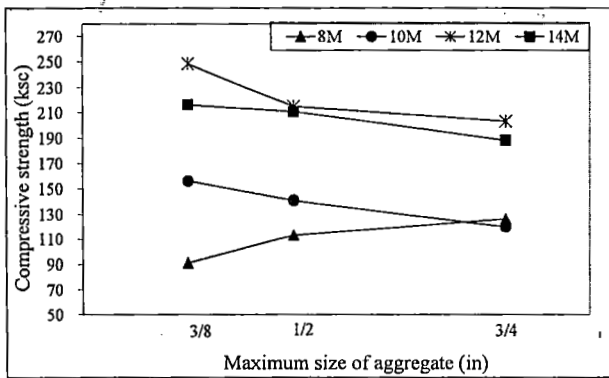
รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน

### 3.1.3 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

เมื่อพิจารณาผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน ดังรูปที่ 5 พบว่า ขนาดมวลรวมหยาบที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นไป ขณะที่การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (8 โมลาร์) กลับพบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ให้กำลังอัดเมื่อใช้ขนาดของมวลรวมหยาบ 3/8" (S), 1/2" (M) และ 3/4" (L) เท่ากับ 216.3, 210.8 และ 188.3 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ขณะที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนในกลุ่มเดียวกัน เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์มีกำลังอัดเท่ากับ 91.1, 113.1 และ 126.5 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ผลการศึกษาดังนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้ขนาดของมวลรวมหยาบที่ละเอียดขึ้นในจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น) ส่งผลดีต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ซึ่งอาจเกิดจากมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลงมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ยึดเกาะระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมได้แข็งแรงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนมีกำลังอัดจึงสูงขึ้น ส่วนในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำ พบว่า จีโอพอลิเมอร์เพสต์จะมีความแข็งแรงต่ำลง การใช้มวลรวมที่



ละเอียดขึ้น อาจไม่มีผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน ซึ่งสอดคล้องกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปที่พบว่า ขนาดของมวลรวมหยาบที่ละเอียดมากขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตกำลังสูงมากกว่าคอนกรีตกำลังต่ำ [18]



รูปที่ 5 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน

### 3.2 อัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน

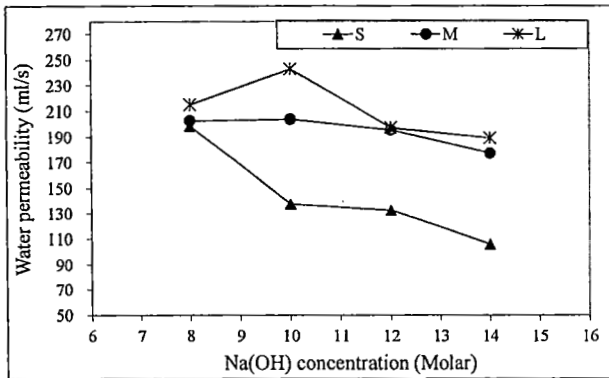
ผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเก้าถาดหิน ดังรูปที่ 6 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนต่ำลง และให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันในมวลรวมหยาบทั้ง 3 ขนาด เช่น การใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็ก (S) ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ ให้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 198.8, 137.6, 132.5 และ 105.8 มล/วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีกำลังอัดที่ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง จึงทำให้ความพูนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีน้อยลง และส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำต่ำลงด้วย [17] นอกจากนี้พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น มีผลต่อการลดอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

พูนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่ เช่น การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 โมลาร์เป็น 14 โมลาร์ พบว่าอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็ก (S) ลดลงเท่ากับ 93 มล/วินาที (ลดจาก 198.8 มล/วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 8 โมลาร์เป็น 105.8 มล/วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นที่ 14 โมลาร์) ขณะที่การใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (L) ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำลดลงเท่ากับ 25.5 มล/วินาที (ลดจาก 214.9 มล/วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 8 โมลาร์เป็น 189.4 มล/วินาที ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 14 โมลาร์) ผลดังกล่าวอาจเกิดจากมวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะได้ดีกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ จึงมีผลให้อัตราการไหลของน้ำของคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก ขึ้นกับสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ มากกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์แข็งแรงมากขึ้น จึงส่งผลให้ลดอัตราการไหลของน้ำในคอนกรีตพูนลงได้ โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้า [2] ที่พบว่า การลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตพูนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามความพูนที่มากขึ้น มีผลชัดเจนในคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่

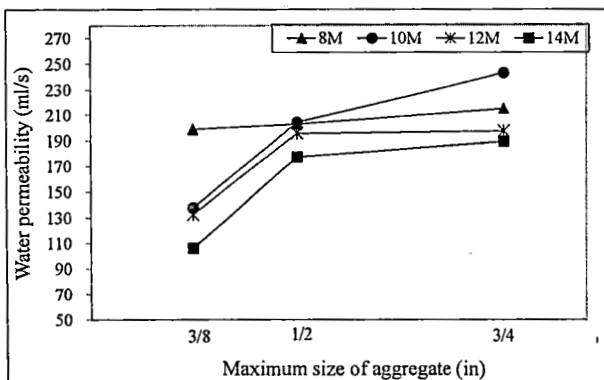
รูปที่ 7 แสดงผลของขนาดมวลรวมหยาบต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเก้าถาดหิน พบว่า มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนเพิ่มมากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้มวลรวมหยาบขนาด S, M และ L มีอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 105.8, 177.2 และ 189.4 มล/วินาที ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากขนาดของช่องว่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมขนาดใหญ่ มีมากกว่ามวลรวมขนาดเล็ก จึงส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 5 อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์  
คอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	อัตราการไหลของน้ำ (มล/วินาที)
8M-S	198.8
8M-M	202.7
8M-L	214.9
10M-S	137.6
10M-M	204
10M-L	243.1
12M-S	198.8
12M-M	198.8
12M-L	197.3
14M-S	108.8
14M-M	197.3
14M-L	198.8



รูปที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 7 ผลของขนาดมวลรวมหยาบต่ออัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน

#### 4. สรุปผล

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงที่สุด
- 2) การใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีกำลังอัดสูงขึ้น และเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมากกว่ากลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ
- 3) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนมีค่าสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ มีค่าอัตราการไหลของน้ำมากที่สุด
- 4) การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงมีผลต่อการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่
- 5) การใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ขึ้นในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุน ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพรุนเพิ่มมากขึ้น โดยการชิมผ่านของน้ำมีค่าสูงที่สุดในมวลรวมหยาบขนาด 3/4 (L) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2556

#### เอกสารอ้างอิง

1. P. Chindapasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa, "Cement paste characteristics and porous concrete properties", Construction and Building Materials 22, 2008, pp. 894-901.

2. P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, N. Mishima, Y. Yuasa, T. Chareerat, "Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete", *Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 16, 2009, pp. 714-719.
3. S. Tongaronsri, S. Lekauwsay, V. Nunpakde, O. Punyanak. "Development of porous light weight concrete block for green building", *The Journal of Industrial Technology* 7(2), 2011, pp. 22-30, (In Thai).
4. C. Lian, Y. Zhuge, S. Beecham, "The relationship between porosity and strength for porous concrete", *Construction and Building Materials* 25, 2011, pp. 4294-4298.
5. W. Chalee, K. Charoenprom. "Evaluation of sulfate resistance of fly ash-based geopolymer concrete", *KMUTT Research and Development Journal* 35(2), 2012, pp. 157-170, (In Thai).
6. C. Sanawong, W. Chalee. "Chloride penetration of fly ash-based geopolymer concrete under marine environment", *The Journal of KMUTNB* 21(2), 2011, pp. 257-265, (In Thai).
7. P. Chindaprasirt, W. Chalee, C. Jaturapitakkul, U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers", *Waste Management* 29, 2009, pp. 539-543.
8. P. Chawakitchareon, C. Veessommai. "Effect of curing time on strength of geopolymer mortar incorporating silica waste", *The Journal of Industrial Technology* 8(3), 2012, pp. 52-60, (In Thai).
9. J. Temuujin, Riessen A. van, KJD. MacKenzie, "Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature", *Construction and Building Materials* 24, 2010, pp. 1906-1910.
10. J. Davidovits, "Chemistry of geopolymer system, Terminology", *Proceeding of Second International Conference Geopolymer*, 1999, France, pp 9-39.
11. P. Paisitsrisawat, U. Rattanasak. "Effect of silica fume on properties of fluidized combustion (FBC) fly ash geopolymer", *The Journal of Industrial Technology* 9(9), 2013, pp. 40-48, (In Thai).
12. ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, C 618-03. *Annual Book of ASTM Standards* 2003, 04.02.
13. ASTM. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, C 127-12. *Annual Book of ASTM Standards* 2003, 04.02.
14. BS. Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes, BS 1881-116. *British Standards Institution* 1983.
15. T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, P. Chindaprasirt, S. Songpiriyakij, "Influence of Si/Al ratio on compressive strength of rice husk-bark ashes and fly ash-based geopolymer paste", *The 3<sup>rd</sup> ACF international conference ACF/VCA*, 2008, pp. 151-157.
16. C. Sanawong, K. Somna. W. Chalee. "Compressive and bond strengths of fly ash-based geopolymer concrete", *Burapha Sci.* 15(1), 2010, pp. 13-22, (In Thai).
17. C. Sanawong, W. Chalee, "Water permeability in fly ash based geopolymer concrete", *J. of Civil engineering and architecture* 4, 2010, pp. 15-19.
18. P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul. "Cement, Pozzolan and Concrete", 5th ed, *Thailand Concrete Association*, 2008, pp. 11-13, and pp. 238-240, (In Thai).