

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้า  
ถ่านหิน

(Utilization of fly ash-based geopolymer in hollow load-bearing concrete  
masonry blocks)

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

A๐๐1๐๗๓๕๒

กันยายน พ.ศ. 2557

รับบริการ

- 8 ส.ค. 2558  
๐๒๐172782  
346985

- 3 ก.ค. ๒๕๕๘

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้า  
ถ่านหิน

(Utilization of fly ash-based geopolymer in hollow load-bearing concrete  
masonry blocks)

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา  
มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ

พ.ศ. 2557

ทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ  
สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชา  
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การผลิต  
คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหิน” จาก ทุนสนับสนุนการวิจัย สำนัก  
บริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักคณะกรรมการการ  
อุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 โดยมีงบประมาณทั้งโครงการ 360,000 บาท ขณะนี้ผล  
การดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ	:	นายวิเชียร ชาลี
หน่วยงาน	:	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ระยะเวลาดำเนินการ	:	12 เดือน
งบประมาณ	:	360,000 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณมวลรวม ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งกำหนดอัตราส่วนโดยโมลาร์ระหว่าง  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมในส่วนผสมในอัตราส่วน เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:4 (S) 1:6 (M) และ 1:8 (L) โดยน้ำหนัก เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวา-แรม หลังจากนั้นบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอากาศที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ  $65^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชม. และบ่มต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตลอดจนทดสอบการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุทดสอบ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมากขึ้น การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์บล็อกลดลงเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น ปริมาณมวลรวมในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่มากขึ้นไม่เกินปริมาณ M (เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6) ให้กำลังอัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้มวลรวมในส่วนผสมสูงถึงปริมาณ L (เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:8) นอกจากนี้พบว่า อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของ NaOH สูง

คำสำคัญ : เถ้าถ่านหิน, จีโอพอลิเมอร์, คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก, กำลังอัด, ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

## Abstract

This research aimed to study the effect of aggregate content, sodium hydroxide (NaOH) concentrations and curing temperature on compressive strength and water absorption of geopolymer concrete masonry block. The geopolymer concrete block were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The molar ratio of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  was kept constant and concentration of NaOH was varied at 12, 14, 16, and 18 molar. The ratio of 1:4 (S), 1:6 (M) and 1:8 (L) by weight of fly ash : dust limestone were used as a aggregate. The geopolymer concrete block were prepared by using the Cinva-Ram machine. The samples were air cured at room temperature and  $65^\circ\text{C}$  for 24 hours and continuous curing until the age test in air. The geopolymer concrete block was tested for compressive strength at 7, 14, and 28 days air cure. In addition, water absorption of geopolymer concrete block was tested at 28 days.

The results showed that the compressive strength of geopolymer concrete block increase with the increase in NaOH concentration and curing temperature. The water absorption of geopolymer concrete block is low with the concrete of high compressive strength. An increase in amount of aggregate as high as M (the ratio of 1:6 by weight of fly ash : dust limestone) result in increased compressive strength; however, the compressive strength was found to decrease when using high amount of aggregate L (the ratio of 1:8 by weight of fly ash : dust limestone). In addition, high temperature curing has more effective on increasing of compressive strength in geopolymer concrete block with lower NaOH concentration than that with higher NaOH concentration.

**Keyword:** Fly ash, Geopolymer, Load-bearing concrete masonry blocks, Compressive strength, Sodium hydroxide concentration

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักบริหาร โครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้ จะเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น ตลอดจนเป็นการส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมไปสร้างมูลค่า โดยใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งเป็นการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 จีโอโพลิเมอร์	4
2.2 วัสดุพอลิโพรพิลีน	7
2.3 เถ้าถ่านหิน	8
2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์	9
2.5 โซเดียมซัลไฟด์	10
2.6 คอนกรีตบดอัด	11
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	<b>27</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ	27
3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	28
3.4 การทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบดอัด	30

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล</b>	<b>33</b>
4.1 สมบัติของวัสดุทดสอบ	33
4.2 กำลังอัดของจี โอปอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก	35
4.3 การดูดซึมน้ำของจี โอปอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก	48
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>51</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>52</b>
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	55
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	74
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	76



## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์	5
2.2	ขนาดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก	16
2.3	ความหนาของเปลือกและผนังกันโพรง	18
2.4	ขนาดของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก	18
2.5	ความต้านทานแรงอัดและการดูดกลืนน้ำ	20
2.6	ความชื้น (เฉพาะคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักประเภทควบคุมความชื้น)	20
3.1	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก	29
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน	34
4.2	กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก	36

## รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า	
2.1	การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์	5
2.2	โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต	7
2.3	ดีแทคบล็อก	12
2.4	ดีแทคบล็อกชนิดซาโตว์บล็อก	13
2.5	การใช้อินเตอร์ล๊อคกึ่งบล็อก	14
2.6	ลักษณะและขนาดของอินเตอร์ล๊อคกึ่งบล็อก	15
3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ	27
3.2	การอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวาแรม	30
3.3	การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเพื่อทดสอบกำลังอัด	31
3.4	การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเพื่อทดสอบการดูดซึมน้ำ	32
4.1	ภาพถ่ายขยายของเถ้านหินแม่เมาะ	34
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก จากเถ้านหินที่บ่มในอุณหภูมิห้อง	38
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจาก เถ้านหินที่บ่มในอุณหภูมิ 65°C.	39
4.4	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตบล็อกที่อายุ 7 วัน	41
4.5	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน	42
4.6	ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน	44
4.7	ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 7 วัน	46
4.8	ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน	48
4.9	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิ บ่มในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S ที่อายุ 7 และ 28 วัน	48
4.10	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซึมน้ำใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หินขนาดเล็ก และน้ำ ผสมให้เข้ากันดี แล้วอัดในแบบเหล็กให้แน่นและบ่มในอากาศจนมีความแข็งตัวพอที่จะนำไปใช้ในการก่อสร้างได้ คอนกรีตบล็อกมีทั้งแบบรับน้ำหนัก (load-bearing concrete masonry blocks) และไม่รับน้ำหนัก (concrete masonry blocks) ซึ่งมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 57-2533) ได้กำหนดให้คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักต้องสามารถรับน้ำหนักได้ไม่ต่ำกว่า 110 กก/ซม<sup>2</sup> ส่วนคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 58-2533) ได้กำหนดให้รับน้ำหนักได้ไม่ต่ำกว่า 25 กก/ซม<sup>2</sup> การใช้งานคอนกรีตบล็อกในอุตสาหกรรมก่อสร้างมีมากขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่ก่อสร้างได้ง่าย โดยคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้น การก่อสร้างใช้งานจึงเหมาะสมกับอาคารหรือสิ่งก่อสร้างขนาดเล็ก ซึ่งไม่มีความซับซ้อนของการรับแรงเชิงกลของโครงสร้าง

แนวคิดของการผลิตคอนกรีตโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม เริ่มจากการใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al.*, 2009 ; Chindaprasirt *et al.*, 2009) ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา และอะลูมินา ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้ และปัจจุบันพบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้ในอุณหภูมิปกติ (Ambient Temperature) โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการช่วยเร่งปฏิกิริยาอีกต่อไป (Davidovits, 1991) โดยงานวิจัยที่ผ่านมา (Huajun *et al.*, 2013 ; Gum Sung Ryu *et al.*, 2013 ; Anurag *et al.*, 2008 ; Chindaprasirt *et al.*, 2009) ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น ลักษณะของการบ่ม ความเข้มข้นของด่าง และชนิดของวัสดุปอซโซลาน เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาโดยภาพรวม พบว่า การใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุปอซโซลานได้ดี และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ดีขึ้น ตลอดจน

การบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่เกิน 90 °ซ เป็นเวลาไม่เกิน 48 ชม. ก็ส่งผลดีต่อการรับแรงเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์อีกด้วย

สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการใช้งานคอนกรีตที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขาดความมั่นใจในการนำมาใช้งาน เพราะมีฐานข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยที่น้อยเกินไป และยังไม่เกิดปัญหาขาดแคลนปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามแนวการส่งเสริมเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างจริงจังในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ควรเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เป็น การสนับสนุนและเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานให้มากขึ้น โดยเริ่มจากการใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตที่มีความซับซ้อน ไม่มาก และมีลักษณะการรับแรงเชิงกลที่ไม่เสี่ยงต่อการวิบัติและก่อให้เกิดอันตราย เช่น คอนกรีตบล็อกหรือวัสดุงานก่อผนังหรือ โครงสร้างง่ายๆ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักน้ำหนัก (load-bearing concrete masonry blocks) จากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหิน โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่ได้ใช้เถาถ่านหินที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้าในการทำวัสดุประสาน แทน โดยมุ่งประเด็นไปที่ผลของปริมาณของมวลรวมหยาบ อุณหภูมิที่ใช้บ่มและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัด และการดูดน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก เพื่อเพิ่มฐานข้อมูลการวิจัยที่น่าเชื่อถือประกอบการใช้งานให้มั่นใจยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหิน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) ศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการพัฒนา กำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถาถ่านหินเป็นวัสดุประสาน
- 2) ศึกษาผลของปริมาณของมวลรวมหยาบต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถาถ่านหินเป็นวัสดุประสาน
- 3) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถาถ่านหินเป็นวัสดุประสาน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหิน โดยทำการทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำโดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถาถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ซึ่งกำหนดอัตราส่วนระหว่าง Si/Al คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ

12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้หินปูนเป็นมวลรวมแทนที่ในสัดส่วนที่ต่างกัน 3 ขนาด โดยใช้ อัตราส่วน เถ้าถ่านหิน:หินปูน เท่ากับ 1:4, 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก โดยมีส่วนผสมทั้งหมด 12 ส่วนผสม หลังจากนั้น ทำการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในเครื่องอัดคอนกรีตบล็อก โดยจะบ่ม จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอากาศและบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นใช้ พลาสติกใสพันรอบไว้และบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ ในการศึกษาจะทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น ที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน ตลอดจนทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

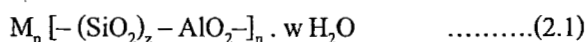
ได้ทราบถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกชนิดรับ น้ำหนักจากเถ้าถ่านหิน เพื่อให้ได้คอนกรีตบล็อกที่มีกำลังอัดสูง การดูดซึมน้ำต่ำ และความหนาแน่น ต่ำ ตลอดจนสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตคอนกรีตบล็อก โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ให้สามารถ ใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 จีโอโพลิเมอร์

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารประกอบซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์สารประกอบซิลิกาที่นิยมใช้กันได้แก่ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอโพลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ดังในสมการที่ (2.1) โดยการทำให้ปฏิกิริยาถูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้ (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al.*, 2009 ; Chindaprasirt *et al.*, 2009)

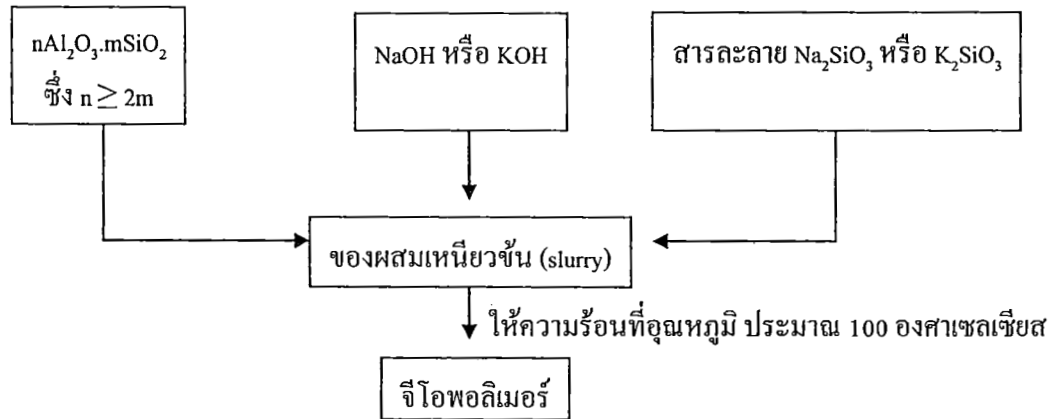


โดยที่	M	คือ ธาตุอัลคาไล
	-	คือ การยึดเกาะพันธะ
	z	คือ จำนวนโมเลกุลของ Si-O <sub>2</sub> เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
	n	คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
	w	คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

#### 2.1.1 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอโพลิเมอร์

สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกันทำให้เกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O) ปกติสารจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO<sub>4</sub> และ SiO<sub>4</sub> ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมาก และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

### ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน



รูปที่ 2.1 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549)

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + จีลิเกต
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ใน สารละลาย	การระงับแข็งที่ Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควมแน่นของสาร เชิงซ้อน Al และ Si ที่ระงับออกมาใน เฟส
อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	90 - 300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ
ช่วงความเป็นกรด-เบส	6 - 11	14

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	ของผสมของเฟลเจลแบบอสัณฐานและกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

### 2.1.2 ปฏิกิริยาซีโอโพลิเมอร์

สารซีโอโพลิเมอร์เป็นสารจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีรูปร่างอสัณฐานแน่นอนเป็นส่วนประกอบของสารลักษณะอสัณฐาน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำซีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายของอัลคาไลสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดีปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาของซีโอโพลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น (Davidovits, 1991)

#### 2.1.2.1 การชะละลาย (dissolution)

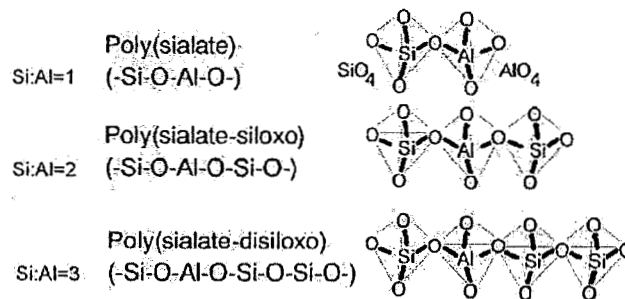
ถ้าด้านหินเมื่อผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ โดยอลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมามาก เนื่องจากจากเป็นสารหลัก เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้นส่วนหนึ่งของด้านหินจะถูกทำลายที่ผิวทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิวและสารละลายจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

#### 2.1.2.2 การทำปฏิกิริยาถูกโซ่ (polymerization)

ผลผลิตของปฏิกิริยาเบื้องต้นเป็นหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมสี่ด้านของ  $Si^{4+}$  และ  $Al^{3+}$  ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบ 4 แซมกับออกซิเจน หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ซึ่งจะมีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น [8] โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วยได้แก่โพลิไซอะเลต (polysialate, PS) โพลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับดังแสดงใน



รูปที่ 2.2 ปริมาณของ  $\text{SiO}_4$  เพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วยเมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกันก็จะเกิดมากขึ้นและหนาแน่นขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต (Davidovits, 1991)

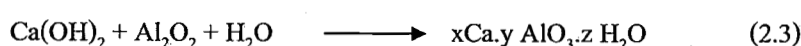
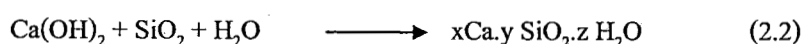
## 2.2 วัสดุปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Matakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีการใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ซึ่งในประเทศไทยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีคุณภาพที่ดี เนื่องจากมีอนุภาคที่กลมตัน มีความละเอียดโดยไม่ต้องผ่านการบดก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งจะทำให้เกิดความประหยัดในงานก่อสร้าง

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาไดรอกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ปฏิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาได้มีการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ได้ โดยวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้งานมากในปัจจุบันได้แก่ เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟุ้ง อย่างไรก็ตามวัสดุประสานดังกล่าวยังจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมอยู่

ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นดังสมการที่ 2.2 และ 2.3



ค่า x, y และ z จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ ซึ่งสมการที่ 2.2 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของซิลิกาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และสมการที่ 2.3 เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับออกไซด์ของอลูมินาทำให้ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ให้กำลังกับคอนกรีตหรือมอร์ตาร์เพราะมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

### 2.3 เถ้าถ่านหิน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ในปัจจุบัน โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมื่อเดินเครื่องเต็มที่จะใช้ถ่านหินลิกไนต์ จากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประมาณวันละ 40,000 ตัน เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเผาถ่านหินลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การเผาถ่านหินจะใช้อุณหภูมิประมาณ 900-1000 °ซ โดยเถ้าถ่านหินลิกไนต์จะมีลักษณะเป็นฝุ่นลอยปนออกไปกับก๊าซร้อน ซึ่งสามารถดักจับได้ด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) โดยทำการแยกฝุ่นออกจากก๊าซร้อนก่อนปล่อยจากปล่องควัน ส่วนเถ้าก้นเตาเกิดจากอนุภาคเล็กๆปะทะกันเองหรือปะทะกับผนังเตา แล้วหลอมติดกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ เรียกว่าตะกรัน (Slag) เมื่อน้ำหนักมากขึ้นตะกรันจะหล่นลงมาสู่ก้นเตาจึงเรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom ash)

#### 2.3.1 ชนิดของเถ้าถ่านหิน

ASTM C618 ได้แบ่งชนิดของเถ้าถ่านหินออกตามองค์ประกอบทางเคมีเป็น 2 ชนิด คือ Class F และ Class C โดย Class F จะประกอบด้วย ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ เหล็ก (FeO<sub>3</sub>) รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของน้ำหนัก ส่วน Class C ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ เหล็ก (FeO<sub>3</sub>) รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนัก แต่ไม่เกินร้อยละ 70 ของ

น้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดอื่น ๆ ที่เหมือนกันทั้ง Class F และ Class C คือ มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ไม่เกินร้อยละ 5 ของน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 6 ของน้ำหนักแต่ถ้าเป็น Class F อนุโลมให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกินร้อยละ 12 ของน้ำหนัก มีปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร) ไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด มีดัชนีกำลังหรือร้อยละกำลังอัดเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดมอร์ต้าร์ควบคุม (ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมด) และมีความต้องการน้ำไม่เกินร้อยละ 105 ของมอร์ต้าร์ควบคุม แต่เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วมีคุณภาพที่ไม่แน่นอนเป็นอย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้าถ่านหินที่นำมาทิ้ง สถานที่จัดทิ้งบางแห่งอาจทิ้งในแอ่งน้ำหรือทิ้งแบบแห้งในที่โล่ง นอกจากนี้เถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วอาจมีสิ่งเจือปนได้ง่ายเพราะคิดว่าเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อะไรได้อีก เช่น โรงไฟฟ้าแม่เมาะนำผลพลอยได้จากการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาทิ้งรวมกับเถ้าถ่านหิน ส่วนเถ้าถ่านหินเดิมมีลักษณะการเกิดเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหินแต่มีขนาดใหญ่กว่ามาก ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานโดยตรงจึงไม่เหมาะสมเพราะเถ้าถ่านหินมีขนาดใหญ่ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยอีกทั้งมีรูพรุนสูงทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นด้วย

### 2.3.2 ความถ่วงจำเพาะ

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

### 2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือ โซดาไฟ (Caustic soda) เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ที่ละลายได้ในน้ำ ประกอบด้วยโลหะโซเดียม และเบสไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นของแข็ง (ในรูปแบบผง เกล็ด เป็นแท่งหรือ เม็ดกลม) ขาว ไม่มีกลิ่น ดูดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 318 องศาเซลเซียส ผลิตได้จากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของน้ำเกลือ และเป็นสารเคมีที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และใช้

ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ สบู่และผลิตภัณฑ์ซักฟอก เคมีภัณฑ์ทำ ความสะอาด โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมโลหะ อาหาร เส้นใยเรยอน สิ่งทอ ใช้ในการฟอกย้อม สีย้อม และช่างเจียรไนพลอยก็ใช้ในขั้นตอนล้างเม็ดพลอยที่เจียรไนเสร็จแล้ว นอกจากนั้นยัง ใช้ปรับสภาพน้ำทิ้งที่มีฤทธิ์เป็นกรด ให้เป็นกลางก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย

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

ถึงแม้ว่าโซดาไฟเป็นสารไม่ติดไฟ แต่ถ้าสัมผัสกับสารบางชนิด เช่นกรดเข้มข้น หรือทำ ปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกันจนเกิดความร้อนพอเพียงและทำให้สารที่ วางอยู่ใกล้ลุกติดไฟได้ การดับเพลิงจึงต้องดูสารที่เป็นคู่ปฏิกิริยาและใช้เครื่องดับเพลิงให้ถูกต้อง การเก็บ ดูแลรักษา และใช้งานควรอยู่ในภาชนะที่กันน้ำปิดสนิทมิดชิดในที่เย็น หลีกเลี่ยงการสัมผัส โดยตรง ควรจัดให้มีอุปกรณ์ป้องกัน เช่น หน้ากาก แวนนิรภัย ถุงมือ ชุดคลุมทั้งตัว รองเท้าบูต และ จัดให้มีฝักบัวล้างตาหรือล้างตัวอยู่ใกล้เคียงบริเวณที่ทำงาน

## 2.5 โซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) หรือที่รู้จักกันในชื่อ "น้ำแก้ว หรือ น้ำกาวย" ในรูปที่ 2.5 เป็นสารประกอบไปด้วย โซเดียมออกไซด์, ซิลิกา และน้ำ ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และ สารเคมีตัวนี้เป็นน้ำยาบ่มคอนกรีตชนิดโซเดียม ซิลิเกต สามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีต และปูนฉาบได้เป็นอย่างดี น้ำที่ถูกล้างกำหนดให้มาทำปฏิกิริยากับหินปูน ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยา ไฮโดรชันอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งแรงขึ้น ลดรูพรุนที่เกิดจากน้ำในคอนกรีตที่ ระเหยออกมาได้

### 2.5.1 กระบวนการผลิตโซเดียมซิลิเกต

เริ่มจากการนำเอาโซดาแอชกับซิลิกามาหลอมให้เป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1200 องศา เซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวเป็นก้อนแก้วแล้วนำไปเข้า เครื่องบ่มอัด โนมิตี เพื่อละลายอีกครั้งให้ กลายเป็นน้ำแก้ว สัดส่วนของโซเดียม กับซิลิกาจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติของ โซเดียมซิลิเกต ถ้าทำ ให้สัดส่วนใกล้เคียงกันมากเราจะได้เป็นผลึกของของแข็งที่เรียกว่าโซเดียมเมตาซิลิเกต

### 2.5.2 ประโยชน์ของโซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกตมีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมก่อสร้าง และ กำลังมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อมและทำให้เกิด โครงสร้างของพวก จีโอโพลิเมอร์ที่ไม่จำเป็นต้อง เผาสูงเหมือนการผลิตเซรามิก สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกถือว่าเป็นสัดส่วนที่น้อยมากๆเมื่อ

เทียบกับการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ เราเอาไว้ใช้สำหรับเป็นตัวช่วยกระจายลอยตัว เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการก่ออิฐเตา เป็นเคลือบใสสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความมันแบบไม่มากนัก เป็นแคंपิดผิวจางๆ

## 2.6 คอนกรีตบล็อก

### 2.6.1 ลักษณะทั่วไปของคอนกรีตบล็อก

โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุก่อที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หินเล็ก ๆ และน้ำ แต่ในงานวิจัยของเราครั้งนี้ ได้ผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอ โพลีเมอร์ จากส่วนผสมของเถ่า่านหิน โซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ หินฝุ่น มาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกแต่ละชนิดไว้ดังนี้

มอก. 57-2516 เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับ คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก

มอก. 58-2516 เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับ คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

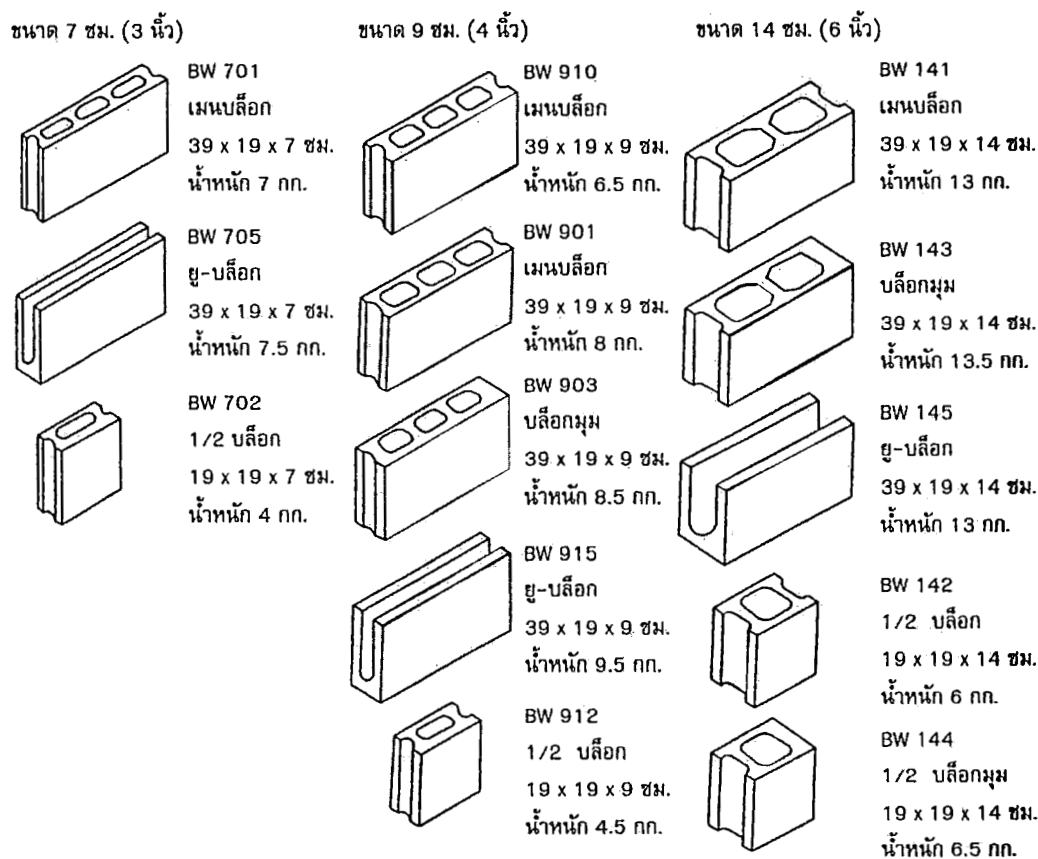
มอก. 59-2516 เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับ อิฐคอนกรีต

มอก. 60-2516 เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับ คอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก

### 2.6.2 ชนิดของคอนกรีตบล็อก

#### 2.6.2.1 คอนกรีตบล็อกที่เรียกตามชื่อสินค้า

คอนกรีตบล็อกมีบริษัทผลิตจำหน่ายในส่วนกลาง มีชื่อสินค้าต่างๆ กัน เช่น ซีแพคบล็อก ดีแทคบล็อก ดังตัวอย่าง ในรูปที่ 2.3

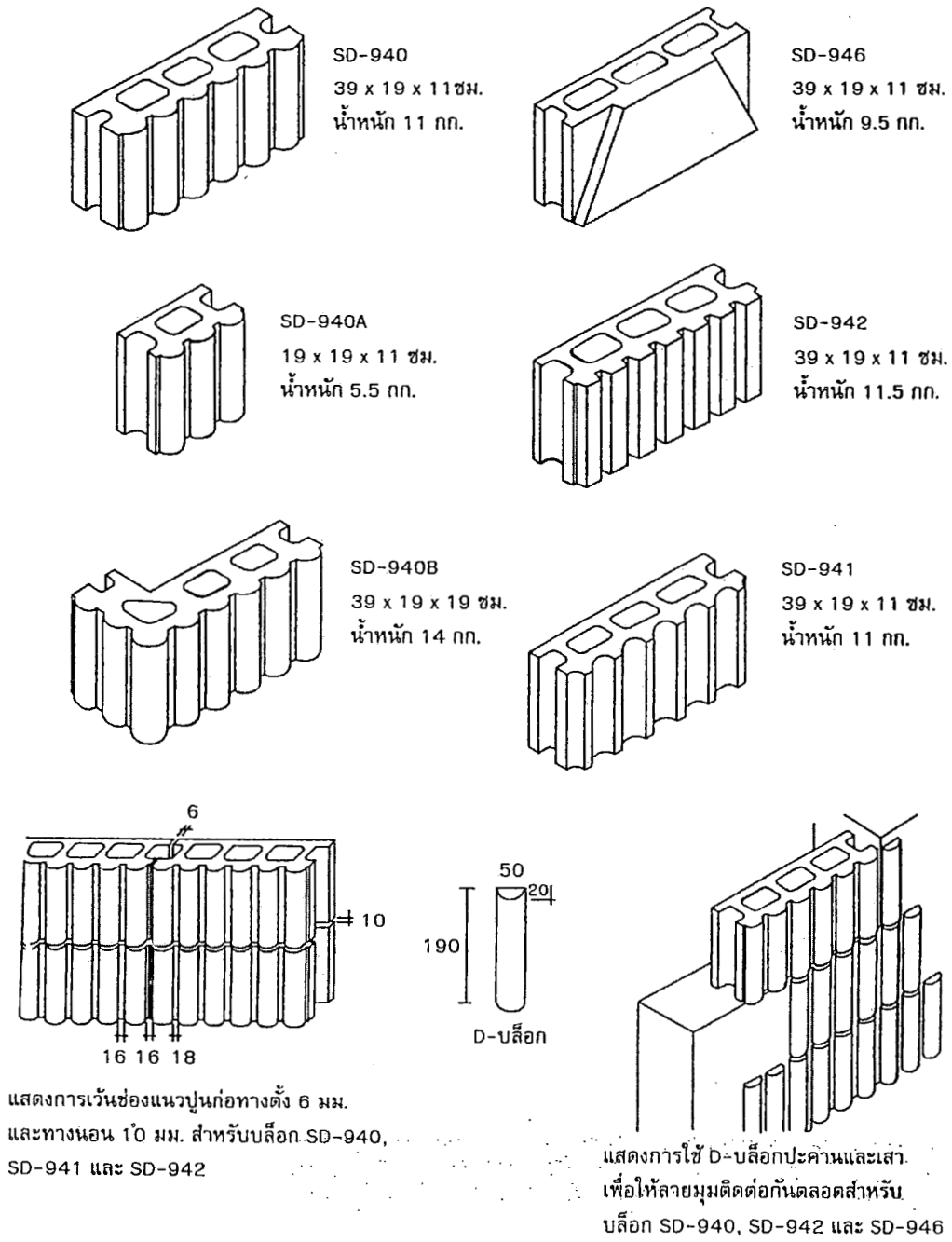


รูปที่ 2.3 ดีแทคบล็อก

ชาโดว์บล็อก เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ล่าสุด ซึ่งได้วิวัฒนาการมาจากคอนกรีตบล็อกธรรมดาที่ใช้ในวงการก่อสร้างทั่วไป สำหรับก่อกำแพงและตกแต่งเสร็จเรียบร้อยไปในตัว ทำให้ประหยัดค่าตกแต่งลงไปได้อีกมาก เหมาะกับการใช้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ชาโดว์บล็อกมีลักษณะเป็นคอนกรีต บล็อกที่มีผิวหน้าขรุขระขึ้นเป็นลวดลาย จากลวดลายนี้สามารถที่จะประสานลายขึ้นใหม่ได้อีกอย่างครบถ้วนตามความประสงค์ของผู้ใช้ ลวดลายเหล่านี้เมื่อกระทบกับแสงแดด เงาที่ตกทอดอย่างสลับซับซ้อนจะก่อให้เกิดความสวยงามอย่างวิจิตรพิสดารยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ชาโดว์บล็อกยังมีคุณสมบัติพิเศษในการรับน้ำหนักได้ถึง 5,000 กิโลกรัมต่อ 1 ก้อน ดังนั้นจึงสามารถก่อเป็นกำแพงรับน้ำหนักได้โดยไม่ต้องมีเสา ทำให้ลวดลายของบล็อกประสานต่อเนื่องกันตลอดทั้งผนัง

ตัวอย่างของชาโดว์บล็อกในรูปที่ 2.4 เป็นเพียงบางส่วนเท่านั้น ผู้ใช้สามารถออกแบบให้เกิดลวดลายขึ้นใหม่ได้ และยังสามารถก่อสร้างกับคอนกรีตบล็อกชนิดผิวเรียบธรรมดาได้ เมื่อต้องการเน้นลวดลายเป็นบางส่วน



รูปที่ 2.4 ดีแทคบล็อกชนิดขาโดว์บล็อก

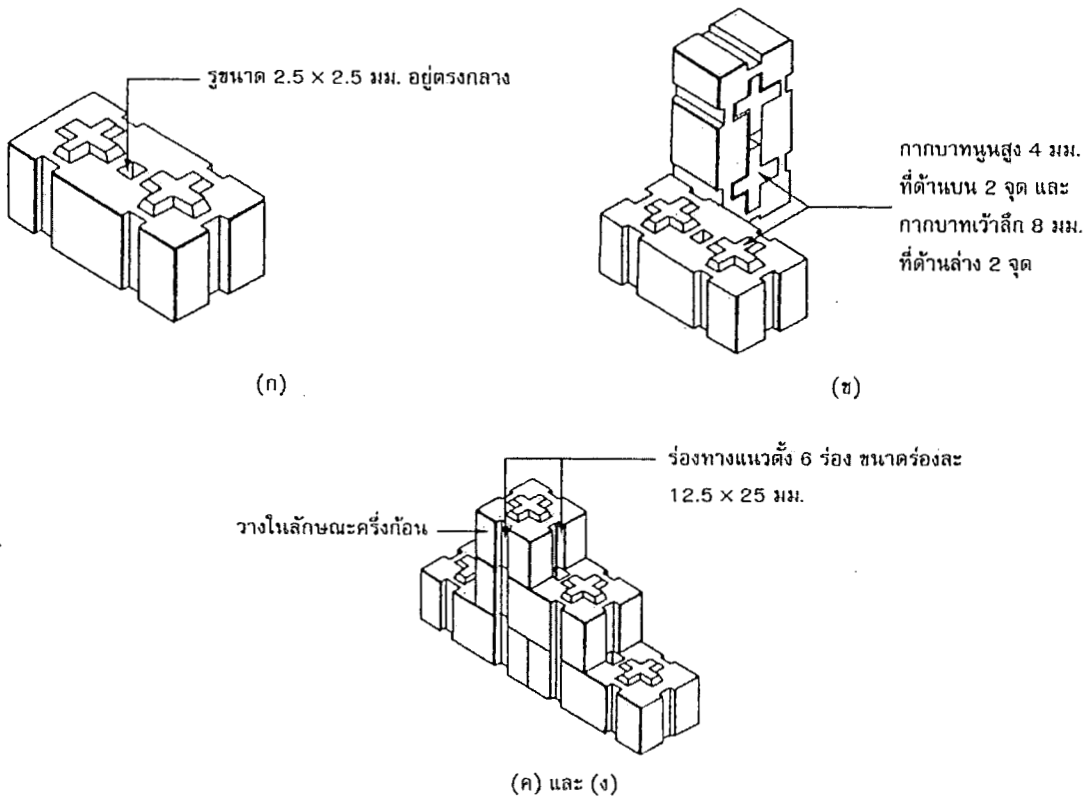
2.6.2.2 อินเตอร์ล๊อคกึ่งบล็อก (Inter Locking Block) คือบล็อกที่ได้รับการออกแบบพัฒนาให้มีลักษณะพิเศษตามหน้าที่การใช้งานอย่างแท้จริง ซึ่งมีการใช้งาน 4 ลักษณะดังนี้

ก. จากรูปที่ 2.5 (ก) มีรูขนาด 2.5 x 2.5 มิลลิเมตรอยู่ตรงกลางสำหรับหยอดน้ำปูนทรายเชื่อมระหว่างก้อนบนและล่างทางแนวตั้ง และใช้เสริมเหล็กยึดโครงหลังคา

ข. จากรูปที่ 2.5 (ข) มีกากบาททูนสูง 4 มิลลิเมตรที่ด้านบน 2 จุด และมีกากบาทเว้าลึก 8 มิลลิเมตรที่ด้านล่าง 2 จุด เมื่อวางมาซ้อนทับเป็นแนวตรงหรือแนวสลับจะครอบกันได้สนิท (locked block) ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนทางแนวนอนได้

ค. จากรูปที่ 2.5(ค) มีร่องทางแนวตั้งได้ 6 ร่อง ขนาดร่องละ 12.5 x 25 มิลลิเมตรสำหรับวางบล็อกต่อและหยอดน้ำปูนทรายเชื่อมตามแนวนอน ร่องแต่ละร่องสามารถถอดออกได้

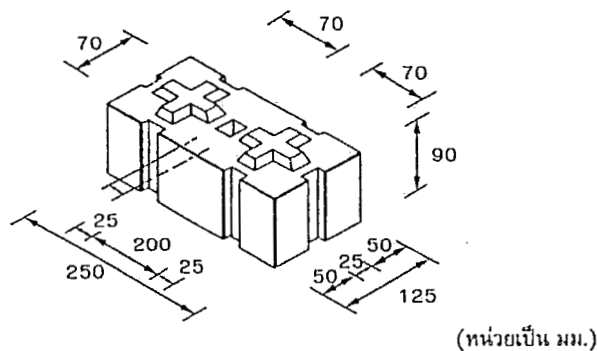
ง. จากรูปที่ 2.5 (ง) สามารถทำครั้งก่อนได้ เพื่อใช้ในการก่อแบบสลับแนวให้ได้แนวตรงทางแนวตั้งตรงมุมหรือหัวท้ายผนัง



### รูปที่ 2.5 การใช้อินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

ขนาดของอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ขนาดเต็มก้อน มีความกว้าง 125 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร และสูง 90 มิลลิเมตร และขนาดครึ่งก้อน มีความกว้าง 125 มิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร และสูง 90 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.6





รูปที่ 2.6 ลักษณะและขนาดของอินเทอร์ล็อกกึ่งบล็อก

### 2.6.3 ข้อกำหนดเกี่ยวกับคอนกรีตบล็อก

มาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดรายละเอียดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 58-2533 หมายถึงคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ได้กำหนดรายละเอียดไว้ดังนี้

#### 2.6.3.1 ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ประเภทและสัญลักษณ์ ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน วัสดุ คุณสมบัติที่ต้องการ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

#### 2.6.3.2 บทนิยาม

คอนกรีตบล็อก (Hollow concrete block or hollow concrete masonry unit) หมายถึง ก้อนคอนกรีตทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสมที่เหมาะสมชนิดต่างๆ และจะมีสารอื่นผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ สำหรับก่อผนังหรือกำแพง มีรูหรือโพรงขนาดใหญ่ตลอดก้อน และมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิที่ระนาบขนานกับผิวรายน้อยกว่าร้อยละ 75 ของพื้นที่หน้าตัดรวมที่ระนาบเดียวกัน

คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Hollow non-load-bearing concrete masonry unit) หมายถึง คอนกรีตบล็อกใช้สำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนักบรรทุกใด ๆ นอกจากน้ำหนักตัวเอง เปลือก (Face-shell) หมายถึง ผนังของคอนกรีตบล็อก ซึ่งเชื่อมต่อกับผนังกันโพรง

#### 2.6.3.3 ประเภทและชั้นคุณภาพ

##### a) คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐานนี้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

ก. ประเภท 1 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่ควบคุมความชื้น ใช้สัญลักษณ์ 1

- ข. ประเภท 2 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่ไม่ควบคุมความชื้น ใช้สัญลักษณ์ 2 a-1) ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
- ก. ความหนาของเปลือกต้องไม่น้อยกว่า 12 มิลลิเมตร
- ข. ขนาดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักให้มีขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยจะคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 2$  มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.2 ขนาดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

ขนาด หนา x สูง x ยาว ( มม. <sup>3</sup> )
70 x 190 x 140
90 x 190 x 140
140 x 190 x 140
190 x 190 x 140
70 x 190 x 190
90 x 190 x 190
140 x 190 x 190
190 x 190 x 190
70 x 190 x 290
90 x 190 x 290
140 x 190 x 290
190 x 190 x 290
70 x 190 x 390
90 x 190 x 390
140 x 190 x 390
190 x 190 x 39

หมายเหตุ ขนาดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่กำหนดนี้ เป็นขนาดที่ออกแบบ เพื่อให้เป็นไปตามระบบการประสานทางพิคัดในการก่อสร้างอาคาร ซึ่งได้กำหนดหน่วยพิคัดมาตรฐานให้เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และกำหนดความหนาของปูนก่อในรอยต่อมาตรฐานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

## a-2) กำลังรับแรงกดอัด

- กำลังรับแรงกดอัดเฉลี่ยของพื้นที่รวมของคอนกรีตบล็อกจะต้องไม่ต่ำกว่า 2.5 MPa (25 ksc) โดยต้องใช้คอนกรีตบล็อกในการทดสอบไม่น้อยกว่า 5 ก้อน
- กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตบล็อกแต่ละก้อนจะต้องไม่ต่ำกว่า 2 MPa (20 ksc)

## b) คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก

คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักซึ่งทำขึ้นตามมาตรฐานนี้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

ก. ประเภท 1 คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักที่ควบคุมความชื้น

ข. ประเภท 2 คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักที่ไม่ควบคุมความชื้น

คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักแต่ละประเภทแบ่งออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ

- ก. ชั้นคุณภาพ ก ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งต่ำกว่าและเหนือกว่าระดับดิน โดยไม่มีการป้องกันผิวแต่อย่างใด เช่น ใช้ในกรณีซึ่งการรั่วซึมจากน้ำใต้ดินและฝน ไม่ทำความเสียหายต่องานนั้น
- ข. ชั้นคุณภาพ ข ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งต่ำกว่าและเหนือกว่าระดับดิน แต่มีการป้องกันผิว
- ค. ชั้นคุณภาพ ค ใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงภายใน และ กำแพงภายนอกเหนือระดับดิน ที่มีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากดินฟ้าอากาศ

## b-1 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ก. ความหนาของเปลือกและผนังกันโพรงต้องเป็นไปตามตารางที่ 2.3

หมายเหตุ : คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักที่ออกแบบพิเศษให้มีโลหะทนต่อการกัดกร่อนเพื่อยึดระหว่างเปลือกของก้อน อาจอนุญาตให้ทำได้ เมื่อการทดสอบแสดงว่าโลหะยึดนั้นมีสภาพโครงสร้างเทียบเท่ากับผนังกันโพรงคอนกรีตในทางความยึดตัวแข็งกำลังและการยึดกับผนังกันโพรง

ข. ขนาดของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก

ให้มีขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ ตารางที่ 2.4 โดยจะคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 2$  มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.3 ความหนาของเปลือกและผนังกันโพรง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ความหนาของ ก้อน	ความหนาของเปลือก ต่ำสุด <sup>1)</sup>	ความหนาของผนังกันโพรง <sup>2)</sup>	
		ผนังกันโพรงต่ำสุด <sup>1)</sup>	ความหนาผนังกันโพรง เทียบเท่าต่ำสุด ต่อ ความยาว 1 เมตร
90	19	19	135
140	25	25	185
190	31	25	185

**หมายเหตุ** เฉลี่ยจากการวัด 5 ก้อน โดยวัดจากส่วนที่บางที่สุดเมื่อวัดตามวิธีที่กำหนด ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อ ซึ่งทำด้วยคอนกรีตมาตรฐานเลขที่ มอก. 109 ผลรวมจากการวัดความหนาของผนังกันโพรงทั้งหมดในก้อน คูณด้วย 1000หารด้วยความยาวของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักเป็นมิลลิเมตร

ตารางที่ 2.4 ขนาดของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก

มิติปกติ หนา x สูง x ยาว	ขนาดที่ทำ หนา x สูง x ยาว มิลลิเมตร x มิลลิเมตร x มิลลิเมตร
$1 \times 2 \times 1\frac{1}{2}$	90 x 190 x 140
$1\frac{1}{2} \times 2 \times 1\frac{1}{2}$	140 x 190 x 140
$2 \times 2 \times 1\frac{1}{2}$	190 x 190 x 140
$1 \times 2 \times 2$	90 x 190 x 190
$1\frac{1}{2} \times 2 \times 2$	140 x 190 x 190
$2 \times 2 \times 2$	190 x 190 x 190
$1 \times 2 \times 3$	90 x 190 x 290
$1\frac{1}{2} \times 2 \times 3$	140 x 190 x 290
$2 \times 2 \times 3$	190 x 190 x 290
$1 \times 2 \times 4$	90 x 190 x 390
$1\frac{1}{2} \times 2 \times 4$	140 x 190 x 390
$2 \times 2 \times 4$	190 x 190 x 390

**หมายเหตุ:** ขนาดของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักที่กำหนดนี้เป็นขนาดที่ออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามระบบการประสานงานทางฟิสิกส์ ในการก่อสร้างอาคาร ซึ่งได้กำหนดหน่วยฟิสิกส์ มูลฐาน พ ให้เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และกำหนดความหนาของปูนก่อในรอยต่อมาตรฐาน เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

#### 2.6.4 คุณลักษณะที่ต้องการ

##### ก. ลักษณะทั่วไป

- คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักทุกก้อน ต้องแข็งแรง ปราศจากรอยแตกร้าว หรือส่วนเสียบอื่นใด อันเป็นอุปสรรคต่อการก่อคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักอย่างถูกต้องหรือทำให้สิ่งก่อสร้างเสียดำล้างหรือความคงทนถาวร รอยแตกร้าวเล็กน้อยที่มักเกิดขึ้นในกรรมวิธีผลิตตามปกติหรือรอยปริเล็กน้อยเนื่องจากวิธีการเคลื่อนย้ายหรือขนส่งอย่างธรรมดา จะต้องไม่เป็นสาเหตุอ้างในการไม่ยอมรับ

- คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ซึ่งต้องการฉาบปูนหรือแต่งปูนต้องมีผิวหน้าหยาบพอควรแก่การจับยึดของปูนฉาบหรือปูนแต่งได้อย่างดี

- คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ซึ่งต้องการก่อแบบผิวเผย ด้านผิวเผยจะต้องไม่มีรอยป็น รอยร้าว หรือตำหนิอื่นๆ ถ้าในการสังเคราะห์หนึ่งมีก้อนซึ่งมีรอยป็นเล็กน้อยที่ยาวมากกว่า 25 มิลลิเมตรเป็นจำนวนไม่มากกว่าร้อยละ 5 จะต้องไม่ถือเป็นสาเหตุในการไม่ยอมรับ การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

ข. ความต้านทานแรงอัดและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักเมื่อส่งถึงที่ก่อสร้าง ต้องเป็นไปตามตาราง ที่ 2.5

- ทั้งค่าเฉลี่ยและค่าแต่ละก้อนต้องเป็นไปตามตารางที่ 2.5

- การทดสอบให้ปฏิบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อซึ่งทำด้วยคอนกรีต มาตรฐานเลขที่ มอก. 109

ตารางที่ 2.5 ความต้านทานแรงอัดและการดูดกลืนน้ำ

ชั้น คุณภาพ	ความต้านทานแรงอัด ต่ำสุด (MPa)				การดูดกลืนน้ำ สูงสุด เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อค 5 ก้อน (kg/m <sup>3</sup> )					
	เฉลี่ยจากพื้นที่รวม		เฉลี่ยจากพื้นที่สุทธิ		น้ำหนักคอนกรีตเมื่ออบแห้ง (kg/m <sup>3</sup> )					
1)	เฉลี่ยจาก คอนกรีต บล็อค 5 ก้อน	คอนกรีต บล็อคแต่ ละก้อน	เฉลี่ยจาก คอนกรีต บล็อค 5 ก้อน	คอนกรีต บล็อคแต่ ละก้อน	1680 และ น้อย กว่า	1681 ถึง 1760	1761 ถึง 1840	1841 ถึง 1920	1921 ถึง 2000	มาก กว่า 2000
ก	7	5.5	14	14	240	224	208	192	176	240
ข	7	5.5	-	-	288	272	256	240	224	208
ค	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> วัตถุประสงค์ในการใช้คอนกรีตบล็อคชั้นคุณภาพต่างๆ ตามภาคผนวก ก.

ค. ปริมาณความชื้น (เฉพาะคอนกรีตบล็อครับน้ำหนักประเภทควบคุมความชื้น)เมื่อส่งถึงที่ก่อสร้าง ต้องเป็นไปตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความชื้น (เฉพาะคอนกรีตบล็อคไม่รับน้ำหนักประเภทควบคุมความชื้น )

ร้อยละของการหดตัวทางยาว <sup>1)</sup>	ความชื้น สูงสุด ร้อยละของการดูดกลืนน้ำทั้งหมด (เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อค 5 ก้อน)		
	ความชื้นสัมพัทธ์รายปีเฉลี่ย ร้อยละ <sup>2)</sup>		
	น้อยกว่า	50 ถึง	มากกว่า
	50	75	75
0.03 และน้อยกว่า	35	40	45
มากกว่า 0.03 ถึง 0.045	30	35	40
มากกว่า 0.045	25	30	35

- หมายเหตุ <sup>1)</sup> ทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบการหดแห้งของคอนกรีตบล็อค (ในกรณีที่ยังมิได้มีการประกาศกำหนดมาตรฐานดังกล่าว ให้เป็นไปตาม ASTM C 426)
- <sup>2)</sup> อาศัยสถิติตามประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยา สำหรับสถานที่ใกล้แหล่งผลิตมากที่สุด

#### 2.6.5 เครื่องหมายและฉลาก

ก. ที่คอนกรีตบล็อคไม่รับน้ำหนักทุกก้อน อย่างน้อยต้องมีเลข อักษรหรือเครื่องหมาย แจ้งรายละเอียดต่อไปนี้อย่างชัดเจน

- สัญลักษณ์แสดงประเภท

- ชื่อผู้ทำหรือ โรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้า ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

ข. ผู้ทำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นไปตามนี้ จะแสดงเครื่องหมายมาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้นได้ต่อเมื่อ ได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

#### 2.6.6. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

ก. รุ่น ในที่นี้ หมายถึง คอนกรีตบล็อคไม่รับน้ำหนักประเภทและขนาดเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

ข. การชักตัวอย่างเพื่อการทดสอบ ให้กระทำ ณ สถานที่ผลิต และต้องใช้เวลาสำหรับการทดสอบจนครบทุกรายการอย่างน้อย 10 วัน

ค. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

- การชักตัวอย่าง ให้เป็นไปตาม มอก. 109 โดยชักตัวอย่างที่บกพร่องเนื่องจากการขนส่งออกเสียก่อน แล้วจึงชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันมาทำเป็นตัวอย่างทดสอบ

- เกณฑ์ตัดสิน ตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 2.6.3.3 และข้อ 2.6.4 ทุกข้อ จึงจะถือว่าคอนกรีตบล็อคไม่รับน้ำหนักรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ในกรณีที่มิตัวอย่างใดไม่เป็นไปตามข้อ 2.6.3.3 ข้อ 2.6.4 (ก.) ข้อ 2.6.4 (ข.) ข้อ 2.6.4 (ค.) รายการใดรายการหนึ่ง ให้ชักตัวอย่างจากรุ่นเดียวกันจำนวน 2 เท่าของชุดตัวอย่าง มาทดสอบซ้ำในรายการนั้นผลการทดสอบซ้ำตัวอย่างทุกชุดต้องเป็นไปตามข้อ 2.6.3.3 ข้อ 2.6.4 (ก.) ข้อ 2.6.4 (ข) หรือข้อ 2.6.4 (ค.) แล้วแต่กรณี จึงจะถือว่าคอนกรีตบล็อคไม่รับน้ำหนักรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ยกเว้นรายการความต้านแรงอัด ตัวอย่างต้องมีความต้านแรงอัดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 ของเกณฑ์ที่กำหนด จึงจะยอมให้ทดสอบซ้ำในรายการความต้านแรงอัดได้

## 2.6.7 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบดอัด

### 2.6.7.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อมวลหาได้โดยการชั่ง ซึ่งมีหน่วยเป็น กิโลกรัม ส่วนปริมาตรของบดอัดคอนกรีตนั้นหาได้โดยวิธีการแทนที่น้ำเช่น อาจทำได้โดยการจมวัตถุนั้นลงในภาชนะที่มีน้ำอยู่ ตราบใดที่วัตถุไม่ละลายหรือดูดซับน้ำ ปริมาตรของน้ำส่วนที่เพิ่มขึ้น หรือปริมาตรของน้ำที่ล้นออกมาในกรณีเดิมที่มีน้ำอยู่เต็มภาชนะพอดี จะเท่ากับปริมาตรของวัตถุนั้น วิธีการนี้เป็นการหาปริมาตรของวัตถุโดยการแทนที่น้ำ แล้วปริมาตร มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร เป็นต้น

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะได้ว่า

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ กก./ม}^3 \quad (2.4)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่น (กก./ม<sup>3</sup>)

$m$  = มวล หาได้โดยการชั่ง (กก.)

$V$  = ปริมาตร (ม<sup>3</sup>)

สำหรับค่าความหนาแน่นของน้ำ  $\rho_w$  มีค่าเท่ากับ 1,000 กก./ม<sup>3</sup>

ความหนาแน่นของบดอัดคอนกรีตเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์หรือทางด้านกายภาพน้ำหนักขึ้นอยู่กับวัสดุ

### 2.6.7.2 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นหมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในบดอัดคอนกรีตต่อน้ำหนักของบดอัดคอนกรีตที่อบแห้งแล้ว คูณด้วย 100 คิคเป็นเปอร์เซ็นต์ เขียนสูตรได้ว่า

$$\omega = \frac{W_w \times 100}{W_s} (\%) \quad (2.5)$$

โดยที่  $\omega$  = ปริมาณความชื้นของบดอัดคอนกรีต (%)

$W_w$  = น้ำหนักของน้ำที่มีอยู่บดอัดคอนกรีต (กรัม) หาได้โดยเอาน้ำหนักบดอัดคอนกรีตที่ขึ้นลบด้วยน้ำหนักบดอัดคอนกรีตอบแห้ง

$W_s$  = น้ำหนักบดอัดคอนกรีตที่อบแห้ง (กรัม)

### 2.6.7.3 การดูดซึมน้ำของบดอัดคอนกรีต

การดูดซึมน้ำของบดอัดคอนกรีตสามารถบอกถึงความคงทนของบดอัดคอนกรีต การทดสอบการดูดซึมน้ำของบดอัดคอนกรีตก่อสร้าง ปกติให้แช่บดอัดคอนกรีตในน้ำ 24 ชั่วโมง

การดูดซึมน้ำของอิฐ หมายถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในอิฐหลังจากนำไปแช่น้ำต่อน้ำหนักอิฐอบแห้ง นิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ จึงคูณด้วย 100 เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของบดอัดคอนกรีต} = \frac{W' - W_s}{W_s} \times 100 (\%) \quad (2.6)$$



โดยที่  $W'$  = น้ำหนักของบล็อกคอนกรีตหลังจากแช่น้ำ (กรัม)

$W_s$  = น้ำหนักบล็อกคอนกรีตที่อบแห้ง (กรัม)

การดูดซึมน้ำมากน้อยเท่าใดเป็นเครื่องแสดงคุณภาพของบล็อกคอนกรีต เช่น บล็อกคอนกรีตถ้าบล็อกคอนกรีตดูดซึมน้ำมากแสดงว่ามีความพรุนของเนื้อบล็อกคอนกรีตมาก สำหรับงานก่อสร้างบล็อกคอนกรีตควรนำบล็อกคอนกรีตนั้น ๆ มาชุบน้ำให้ชุ่มและอิมตัว และทิ้งไว้ให้ผิวแห้ง ถ้าบล็อกคอนกรีตชุ่มน้ำมากเกินไป จะทำให้ปูนก่อไหลหลุดลงมาได้ การก่อผนังยาก ช่างก่อมักไม่ค่อยทำเพราะยากกว่าก่อบล็อกคอนกรีตแห้ง

#### 2.6.7.4 กำลังอัด

บล็อกคอนกรีตต้องมีความแข็งแรงทนทาน สามารถต้านทานแรงอัดได้ดีพอสมควร หากไม่แน่ใจว่ามีความแข็งแรงทนทาน จำเป็นต้องนำไปทดสอบเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงตามสถาบันของทางราชการที่เชื่อถือได้

การทดสอบรับแรงอัด กระทำได้โดยวางบล็อกคอนกรีตบนเครื่องทดสอบแล้วออกแรงกดจนกระทั่งบล็อกคอนกรีตแตก แล้วอ่านค่าน้ำหนักสูงสุดที่บล็อกคอนกรีตรับได้เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

หน่วยแรงอัดสูงสุด หมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงอัดสูงสุดต่อพื้นที่รับแรง มีหน่วยเป็น กก./ซม<sup>2</sup> เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\text{หน่วยแรงอัดสูงสุด} = \frac{\text{น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)}}{\text{พื้นที่รับแรง (ซม}^2\text{)}} \quad (2.7)$$

### 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อที่จะลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่ โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้วัสดุซีพอลิเมอร์ให้สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้อย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น การศึกษาที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกเพื่อพิจารณาถึงส่วนผสมคอนกรีตบล็อกที่เหมาะสมในเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง อย่างไรก็ตามการศึกษาส่วนใหญ่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมเพื่อเป็นวัสดุประสาน และยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากวัสดุซีพอลิเมอร์

สุรพันธ์ สุคันทรีย์ และคณะ (2546) ได้ทำการวิจัยการศึกษาคอนกรีตบล็อกที่มีเส้นแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาแกลบและเปลือกไม้จากโรงไฟฟ้า มาใช้ในการศึกษา โดยนำเส้นแกลบ-เปลือกไม้ที่มาจากโรงงานโดยตรง และได้รับการบดให้วัสดุข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 25 ถึง 30 มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 20 และ 30 เพื่ออัดอิฐคอนกรีตคอนกรีตที่ผสมเส้นแกลบ-เปลือกไม้และทดสอบกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน พบว่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่ผสมเส้นแกลบ-เปลือกไม้ ขึ้นอยู่กับการแทนที่

๒๕๕. 139  
 © ๕๕๙๓  
 ๒. 2

3 4 6 9 8 5

ปูนซีเมนต์และความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ กล่าวคือ เมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มากขึ้น กำลังอัดยั้งต่ำและความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สูงขึ้นยิ่งทำให้กำลังอัดของอิฐคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้โดยการบดอนุภาคให้มีความละเอียดขึ้น สามารถทำให้มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุพอชโซลานที่ดี และนำมาใช้ผลิตอิฐคอนกรีตได้ดี

ยวดี หิรัญ (2551) ได้ทำการศึกษาการอัดบล็อกปูถนนคอนกรีตพรุน เพื่อศึกษาส่วนผสมของคอนกรีตพรุนที่สามารถอัดขึ้นรูปเป็นบล็อกปูถนนได้ โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ด้านกำลังรับแรงอัด ความชื้นน้ำ และความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อกของบล็อกปูถนน ส่วนผสมของคอนกรีตพรุนใช้หินกรวดที่ร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM และเลือกใช้หินกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") , เบอร์ 4 และ เบอร์ 8 มาผสมกัน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18, 20 และ 22 โดยน้ำหนักหิน และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.35 และ 0.40 จากการวิจัยพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ใช้สัดส่วนละเอียดของหินกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") และเบอร์ 8 อย่างละเท่าๆกันโดยน้ำหนักหิน และส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ใช้สัดส่วนละเอียดของหินกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") , เบอร์ 4 และเบอร์ 8 อย่างละเท่าๆกันโดยน้ำหนักหิน และใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 หรือร้อยละ 22 โดยน้ำหนักหิน จะมีความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อกปูถนนได้ดี และส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) 0.40 ซีเมนต์พิเศษจะเคลือบผิวมวลรวมได้ดี

ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ ทมะ (2552) ได้ศึกษาการทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเถ้าก้นเตา โดยใช้เถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาเถ้าถ่านหินแบบฟลูอิดไดซ์เบด มาใช้เป็นมวลรวมหายาบในส่วนผสมคอนกรีตบล็อก และทำการอัดคอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวา-แรม (Cinva-ram) หลังจากนั้นบ่มคอนกรีตบล็อกในอากาศและทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ตลอดจนทดสอบความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำในคอนกรีตบล็อกที่อายุทดสอบ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของเถ้าก้นเตาที่มากขึ้น และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีตบล็อกมากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกทุกส่วนผสม ที่ได้จากการศึกษามีค่าสูงกว่ามาตรฐานของคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก (มอก. 57-2533) ที่กำหนดให้ไม่ต่ำกว่า 110 กก/ซม<sup>2</sup> และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำน้อยกว่าค่ามาตรฐาน โดยกำหนดไว้ไม่ให้เกินร้อยละ 30 ซึ่งถือว่าคอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดที่ดีเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยจัดเป็นคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภท ก ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ได้มีการนำเอาวัสดุต่างๆ มาเป็นส่วนผสมเพื่อใช้เป็นวัสดุพอชโซลานและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำคอนกรีตบล็อก จะทำให้ได้กำลังอัดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสม ซึ่งวัสดุประสานหลักที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต

ล้อยังคงเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นการศึกษารังนี้จึงพยายามศึกษาการทำคอนกรีตบล็อก โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่จะใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานแทน การศึกษาที่เกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในประเทศไทยยังมีน้อย และยังไม่พบการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ การศึกษาที่เกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สำคัญมีดังนี้

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2548) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ หรือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมจากเถ่าถ่านหิน โดยนำเถ่าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ 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 โดยจะเห็นเม็ดเจลเกิดการก่อตัวรอบๆ เถ่าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีการเปลี่ยนแปลงเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ขึ้น ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์จะให้กำลังอัดสูงสุด  $56 \text{ MPa}$  ที่ระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และวรเชษฐ์ ป้อมเชิงพิณ (2552) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำเป็นส่วนผสม โดยหล่อเป็นตัวอย่างขนาด  $10 \times 10 \times 10 \text{ ซม.}^3$  ซึ่งกำหนดอัตราส่วนทางเคมีต่างกัน 7 ส่วนผสม แบ่งอุณหภูมิบ่มเป็น 2 ชุด บ่มอุณหภูมิห้อง และบ่มอุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน จากการศึกษาพบว่า พฤติกรรมการรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ่าถ่านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้อง มีค่าเท่ากับ  $161 \text{ กก./ซม.}^2$  และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ  $329 \text{ กก./ซม.}^2$  จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ่าถ่านหินลงก็จะได้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ คณะ (2552) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหิน และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ่าถ่านหิน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอ

พอลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

วิเชียร ชาติ และ กิรติกร เจริญพร้อม (2555) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $Na_2SiO_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลุ่มแรกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่ กลุ่มที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6, และ 2.8 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในอากาศ และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตบล็อกได้

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.1.1 โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ ) สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วน  $\text{SiO}_2$  ต่อ  $\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 3.4 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$
- 3.1.2 เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ใช้เถ้าถ่านหิน Class F จาก โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ ในการทดลอง
- 3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) : โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์
- 3.1.4 หินฝุ่น

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

3.2.1 เครื่องอัดบล็อกคอนกรีต ชนิดซินวา-ราม (Cinva-ram)  
เป็นเครื่องอัดดินซีเมนต์บล็อกแบบไม่ต้องใช้ไฟฟ้า (ดังรูปที่ 3.1ก) เคลื่อนย้ายสะดวก แข็งแรงทนทาน สามารถอัดบล็อกได้ด้วยตนเอง คุณสมบัติพิเศษ ใช้แรงคนโยกอัดบล็อกด้วยคานทอดแรงอัดได้ครั้งละ 1 ก้อน ทำบล็อกประสานแบบเต็มก้อนและครึ่งก้อน ได้ในเครื่องเดียว อัตราการผลิตประมาณ 300 -400 ก้อน ต่อวัน ตัวเครื่องผลิตจากเหล็กหนา แข็งแรงทนทานต่อการใช้งานหนัก ผลิตก่อนขนาด  $10 \times 12.50 \times 25$  ซม<sup>3</sup>. โดยใช้ 32 ก้อน ต่อ 1 ตอม.

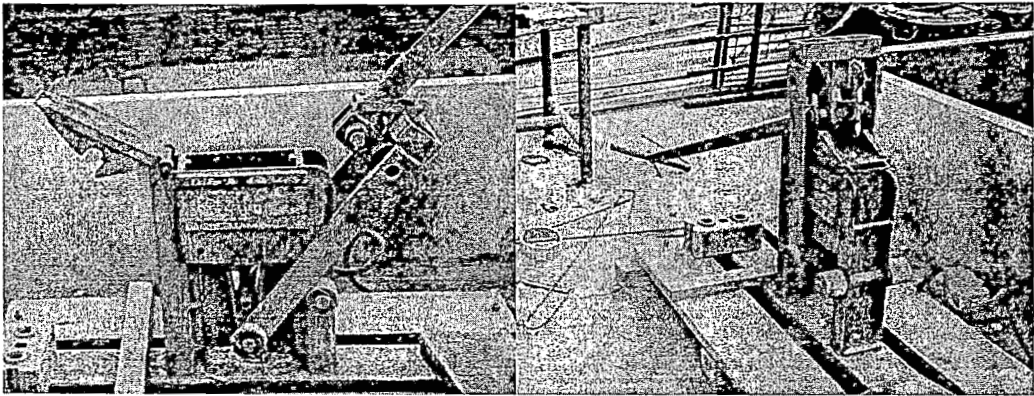
3.2.2 เครื่องทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 3.1ข)

3.2.3 เครื่องตัดบล็อกคอนกรีต (รูปที่ 3.1ค)

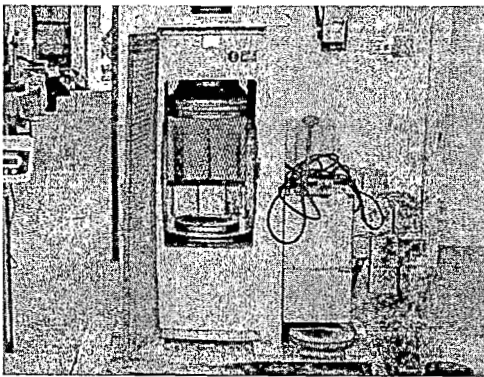
3.2.4 ตู้อบ (รูปที่ 3.1ง)

3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.1จ)

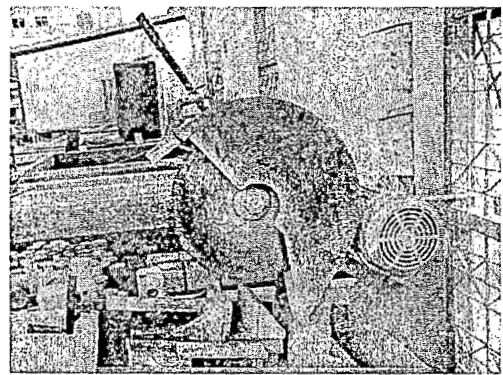
3.2.6 อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ภาชนะผสมสาร เกรียง แผ่นพลาสติกใส



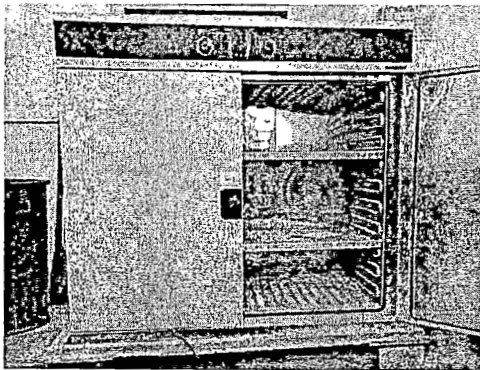
ก) เครื่องอัดบดสัปดาห์คอนกรีตชนิดซินวา-ราม (Cinva-ram)



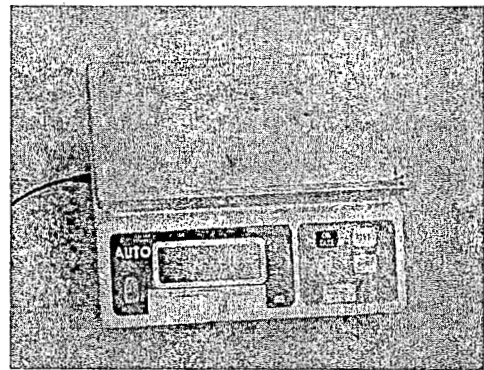
ข) เครื่องทดสอบกำลังอัด



ค) เครื่องตัดบดสัปดาห์คอนกรีต



ง) ตู้อบคอนกรีตบดสัปดาห์



จ) เครื่องชั่งน้ำหนัก

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

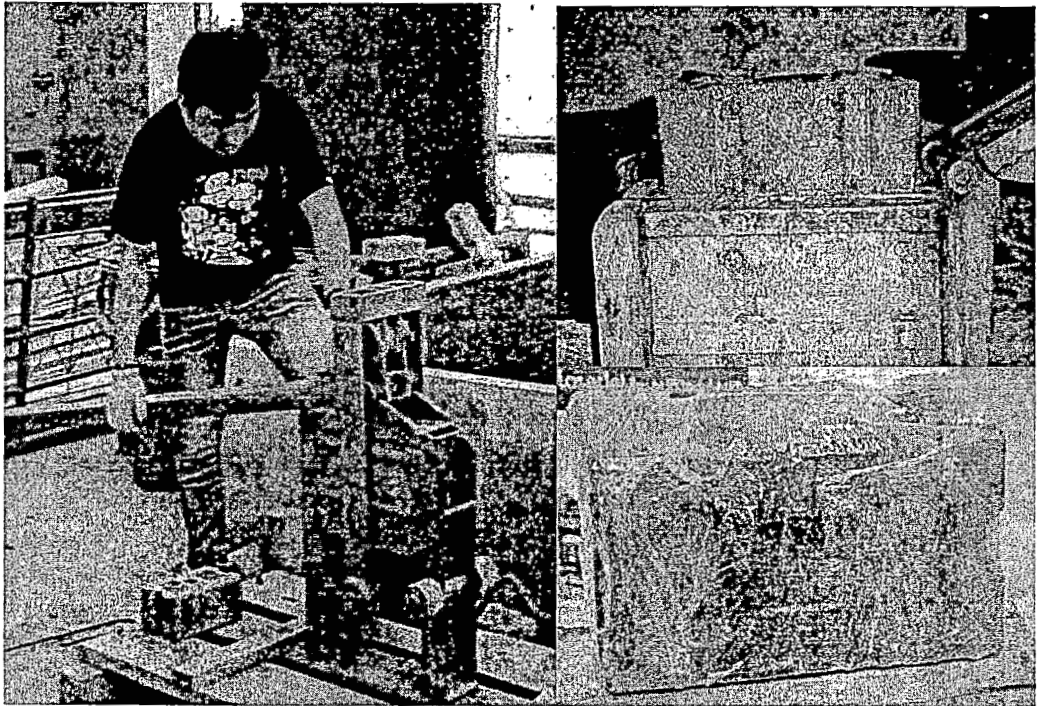
### 3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยได้ศึกษาการผลิตคอนกรีตบดสัปดาห์รับน้ำหนักจากวัสดุอิโพลีเมอร์จากเถาถ่านหิน โดยเตรียมอิโพลีเมอร์เพสต์จากเถาถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ซึ่งกำหนดอัตราส่วนโดยโมลาร์ระหว่าง  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  คงที่ และใช้ความเข้มข้นของ

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ และใช้หินฟูนเป็นมวลรวมในสัดส่วนที่ต่างกัน 3 ขนาด โดยใช้อัตราส่วน เถ้าถ่านหิน:หินฟูน เท่ากับ 1:4(S) 1:6(M) และ 1:8(L) โดยน้ำหนัก โดยมีส่วนผสมทั้งหมด 12 ส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1 ทำการอัดรีดโพลีเมอร์คอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวาแรมดังรูปที่ 3.2 และบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอากาศที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นใช้พลาสติกใสรอบไว้และบ่มต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก					ความเข้มข้นของ NaOH (โมลาร์)	
	เถ้าถ่านหิน (กรัม)	หินฟูน (กรัม)			NaOH (กรัม)		Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>3</sub> (กรัม)
		เถ้าถ่านหิน : หินฟูน					
		1:4	1:6	1:8			
12M-S	1544	6176	0	0	336	668	12
12M-M	1544	0	9264	0	336	668	12
12M-L	1544	0	0	12352	336	668	12
14M-S	1544	6176	0	0	336	668	14
14M-M	1544	0	9264	0	336	668	14
14M-L	1544	0	0	12352	336	668	14
16M-S	1544	6176	0	0	336	668	14
16M-M	1544	0	9264	0	336	668	14
16M-L	1544	0	0	12352	336	668	16
18M-S	1544	6176	0	0	336	668	12
18M-M	1544	0	9264	0	336	668	18
18M-L	1544	0	0	12352	336	668	18



รูปที่ 3.2 การอัดจีโพลิเมอร์คอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวาแรม

### 3.4 การทดสอบตัวอย่างจีโพลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำจีโพลิเมอร์คอนกรีตบล็อก กำลัดอัดและการดูดซึมน้ำของจีโพลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ดังนี้

#### 3.4.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุประสานและมวลรวม ดังนี้

- ทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดแม่เมาะ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตลิเอร์ (Le Chatelier) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อ น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยปริมาตรของวัสดุที่ทำการทดสอบหาได้จากการแทนที่ใน น้ำมันก๊าด ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำกับเม็ดแม่เมาะ ทำให้เม็ดแม่เมาะแข็งตัวและมี ปริมาตรเปลี่ยนไปได้

- ทดสอบความละเอียดของเม็ดแม่เมาะ โดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มี ขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ด้วยวิธีร่อนแบบเปียก ซึ่งทำโดยการชั่งน้ำหนักวัสดุก่อนนำไปร่อน ผ่านตะแกรงโดยใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือนบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

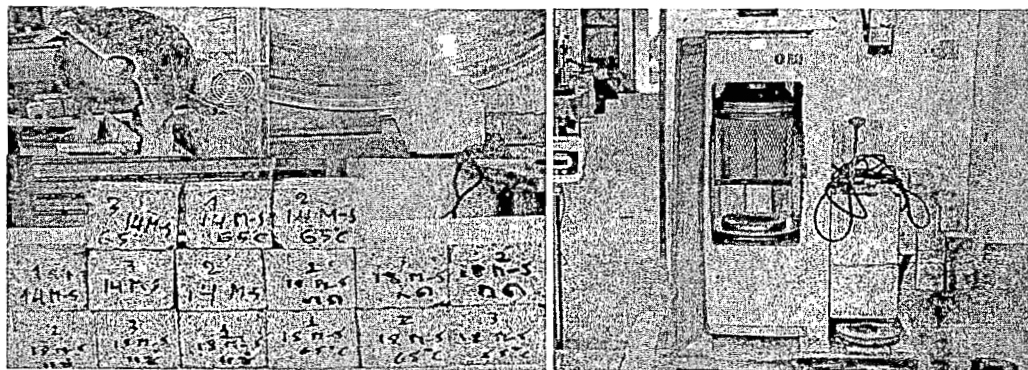
- สั่งตัวอย่างวัสดุประสานถ่ายภาพขยายกำลังสูงของเม็ดแม่เมาะ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของเม็ดแม่เมาะ



- ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C 127 ซึ่งความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน และทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อทราบถึงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลรวม แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิววนอกของมวลรวม

#### 3.4.2 การทดสอบกำลังอัด

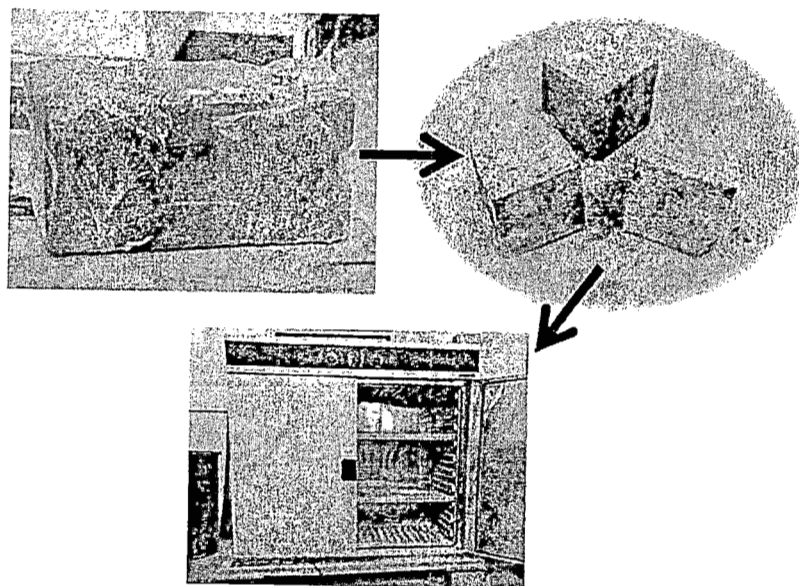
ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน โดยบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อุณหภูมิห้องและอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นใช้พลาสติกใสรอบและบ่มในอากาศจนถึงเวลาที่ทดสอบ เมื่อครบกำหนดทดสอบแต่ละก้อนของอิฐบล็อกได้ตัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม<sup>3</sup> ดังรูปที่ 3.3(ก) เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัด (เฉลี่ยจาก 3 ก้อน) โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดขนาด 300 ตัน (รูป 3.3(ข))



(ก) การตัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก (ข) เครื่องทดสอบกำลังอัดขนาด 300 ตัน  
รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเพื่อทดสอบกำลังอัด

#### 3.4.3 ทดสอบการดูดซึมน้ำ

ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ (absorption test) ตามมาตรฐาน ASTM C642-97 ได้ตัดตัวอย่างคอนกรีตบล็อก ให้มีขนาด 50 x 50 x 50 มม.<sup>3</sup> (รูปที่ 3.4) โดยนำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 – 110 °ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างและแห้งตัวอย่างคอนกรีตบล็อกให้จมอยู่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใช้ผ้าเช็ดให้แห้งโดยรอบอย่างรวดเร็ว และชั่งน้ำหนัก ภายใน 5 นาที คำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก จากน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตบล็อกหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง ลบด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อกที่อบแห้งหารด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อกที่อบแห้งทั้งหมดคูณด้วย 100 โดยทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเพื่อทดสอบการดูดซึมน้ำ

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา และคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดลอกจากเถ้าถ่านหิน ได้แก่ กำลังอัด และความหนาแน่นที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตบดลอกที่บ่มในอากาศและบ่มในอุณหภูมิ 65°C ตามมาตรฐาน ASTM C138

#### 4.1 สมบัติของวัสดุทดสอบ

##### 4.1.1 สมบัติของวัสดุประสาน

##### 4.1.1.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน

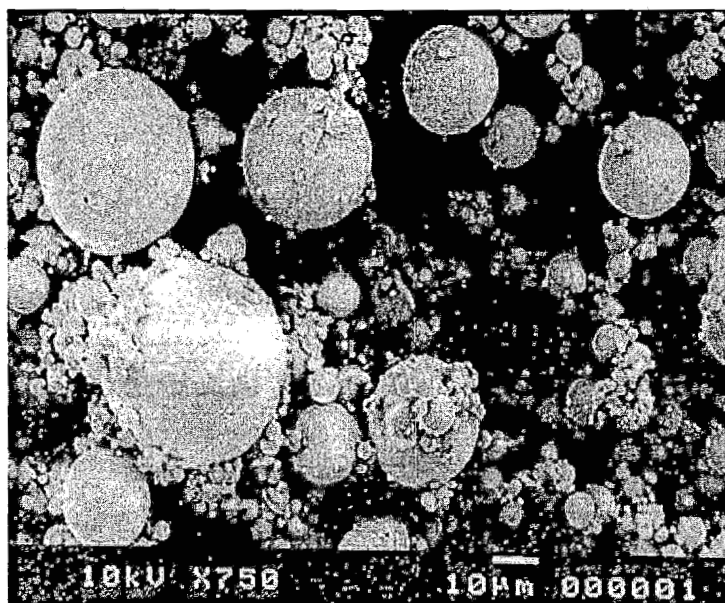
วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้คือเถ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

##### 1. ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน ความละเอียดของเถ้าถ่านหินเป็นปัจจัยบ่งชี้ คุณสมบัติที่ดีอย่างหนึ่งเมื่อใช้เถ้าถ่านหินผสมคอนกรีต ความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีความสำคัญ และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก คือเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าถ่านหินให้สูงขึ้นพบว่าคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีต ทั้งด้านกำลังอัด ความทึบน้ำ และความสามารถในการเทของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย

##### 2. สีและรูปร่าง

เถ้าถ่านหินมีสีน้ำตาลแดงและมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าถ่านหินจากภาพถ่ายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.1 เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีทรงกลมและผิวเรียบและเถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ที่เกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

#### 4.1.1.2 สมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 70.91 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

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

#### 4.1.2 สมบัติของสารละลายที่ใช้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์

สารละลายที่ใช้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตบล็อกประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งอัตราส่วน  $\text{SiO}_2$  ต่อ  $\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์

#### 4.1.3 สมบัติของมวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้หินฝุ่นที่มีความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127-88 เท่ากับ 2.67 และร้อยละ 9.58 ตามลำดับ

### 4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง และ บ่มในอุณหภูมิ 65°C ดังตารางที่ 4.2

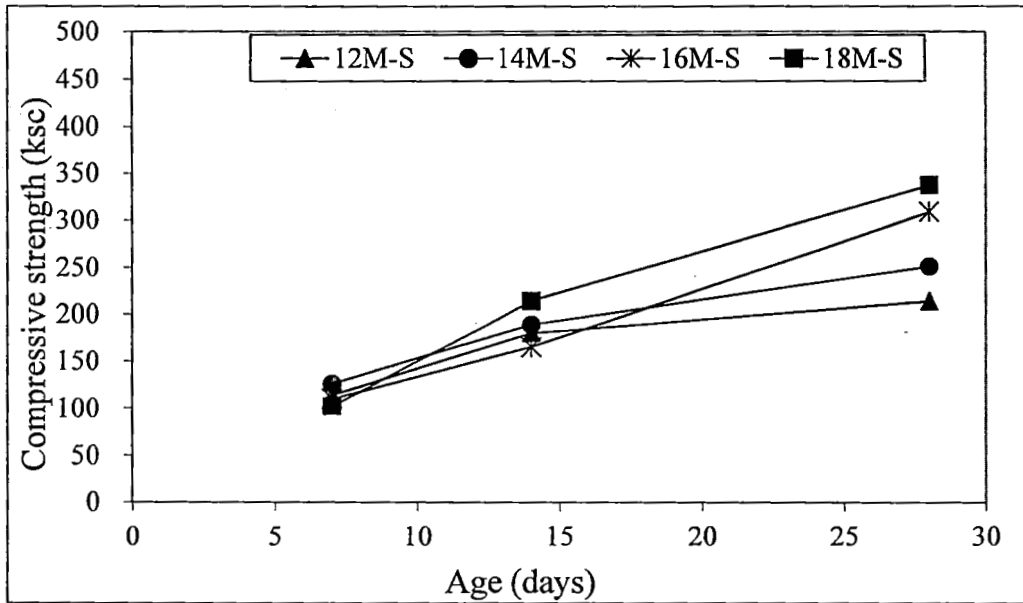
#### 4.2.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

เมื่อพิจารณาการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกดังตารางที่ 4.2 รวมทั้ง รูปที่ 4.2 และ 4.3 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากในด้านพื้นที่บ่ม ในอุณหภูมิห้องและบ่มที่อุณหภูมิ 65°C ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ทุกส่วนผสมมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ บ่มในอุณหภูมิห้อง และหินฝุ่นที่ปริมาณ S M และ L มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 114 198 และ 155 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ และมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 214 268 และ 299 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ที่ความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิ 65°C และ หินฝุ่นที่ปริมาณ S M และ L มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 227 271 และ 244 กก/ซม<sup>2</sup> และมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 360 353 และ 403 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต บล็อกในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน โดยภาพรวมพบว่า การใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ มีแนวโน้มให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปริมาณมวลรวม M และ ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง และบ่มในอุณหภูมิ 65°C มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน เท่ากับ 135.4 176.7 207.5 193.2 และ 130.3 166.8 196.3 184.4 ตามลำดับ การที่ กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีการพัฒนาสูงขึ้น ตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ปฏิกิริยานี้เป็นการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si

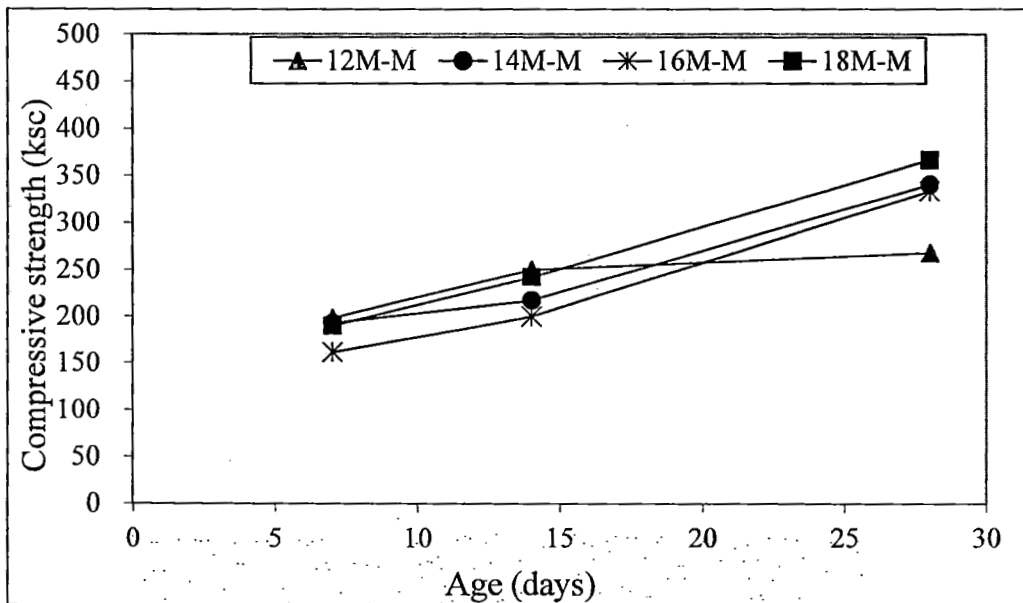
และ AI ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น ทำให้เกิดการอัดตัวเพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดสูงขึ้น (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al.*, 2009 ; Chindaprasirt *et al.*, 2009) เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก พบว่า การบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอุณหภูมิห้องมีการพัฒนากำลังอัดในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน สูงกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิ 65°C และเป็นแนวโน้มนเดียวกันทุกส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65°C เป็นการบ่มในช่วงอายุต้นๆ ซึ่งทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในช่วงต้นให้เร็วขึ้น (Sarker *et al.*, 2013 ; Chindaprasirt *et al.*, 2013) จึงส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มนี้มีค่าสูงที่อายุต้นอยู่แล้ว และมีผลให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

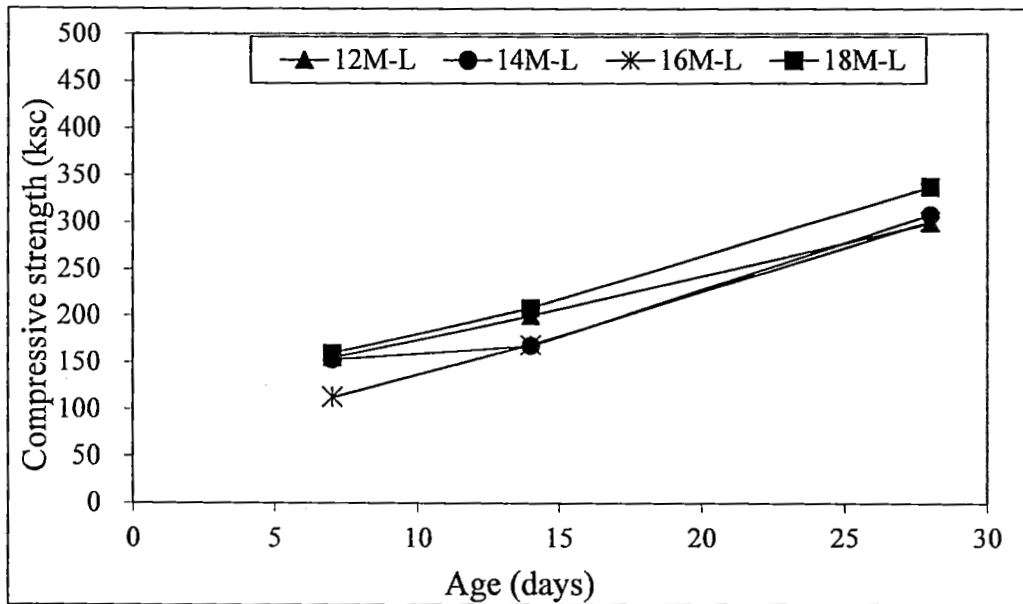
ส่วนผสม	บ่มที่อุณหภูมิห้อง				บ่มที่อุณหภูมิ 65°C			
	กำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)	กำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน		7 วัน	14 วัน	28 วัน	
12 M-S	114	180	214	187.7	227	342	360	158.6
12M-M	198	250	268	135.4	271	330	353	130.3
12M-L	155	200	299	192.9	244	257	403	165.2
14M-S	126	189	251	199.2	239	352	380	159.0
14M-M	193	217	341	176.7	220	420	367	166.8
14M-L	153	168	308	201.3	264	350	413	166.3
16M-S	110	165	306	280.9	213	257	377	177.0
16M-M	161	200	334	201.3	219	263	430	196.3
16M-L	113	169	301	266.4	191	230	425	222.5
18M-S	102	214	338	331.4	151	223	358	237.1
18M-M	193	242	367	199.2	200	345	369	166.3
18M-L	160	208	338	201.3	220	355	414	188.2



ก) หินฝุ่นปริมาณ S

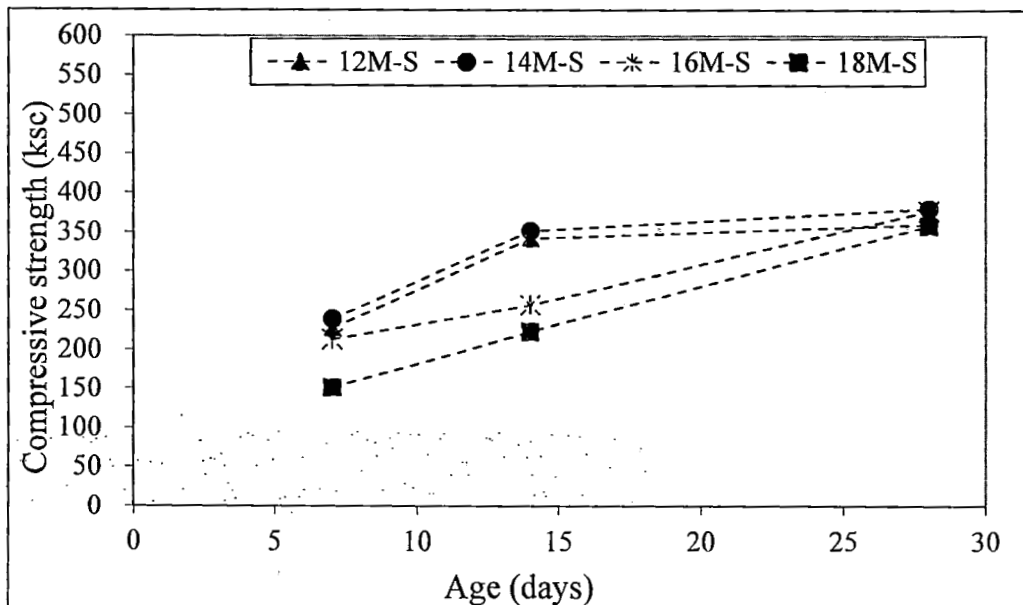


ข) หินฝุ่นปริมาณ M



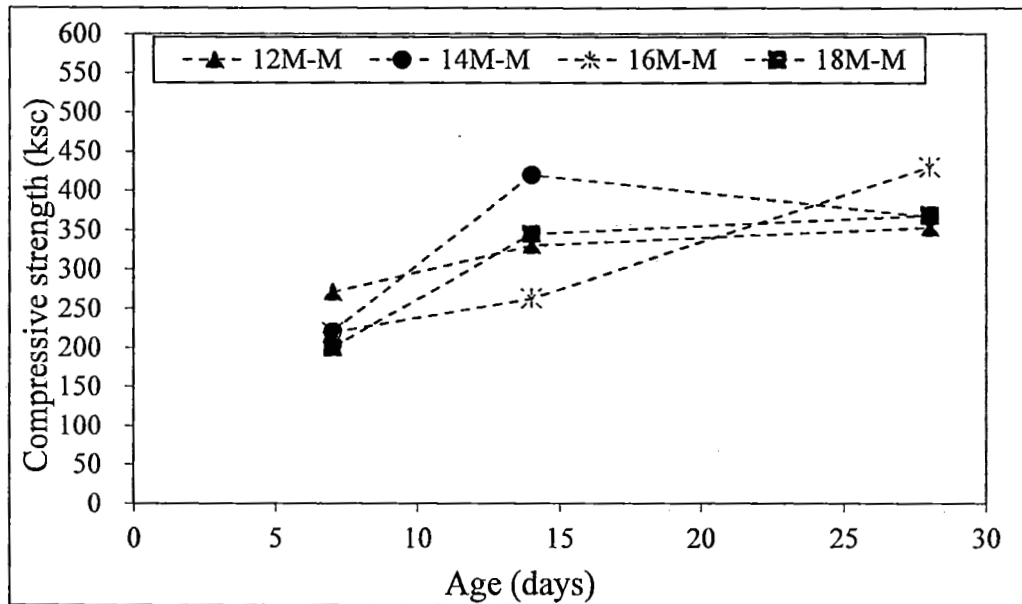
ก) หินฝุ่นปริมาณ L

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดสีกจากเถ้าถ่านหินที่บ่มในอุณหภูมิห้อง

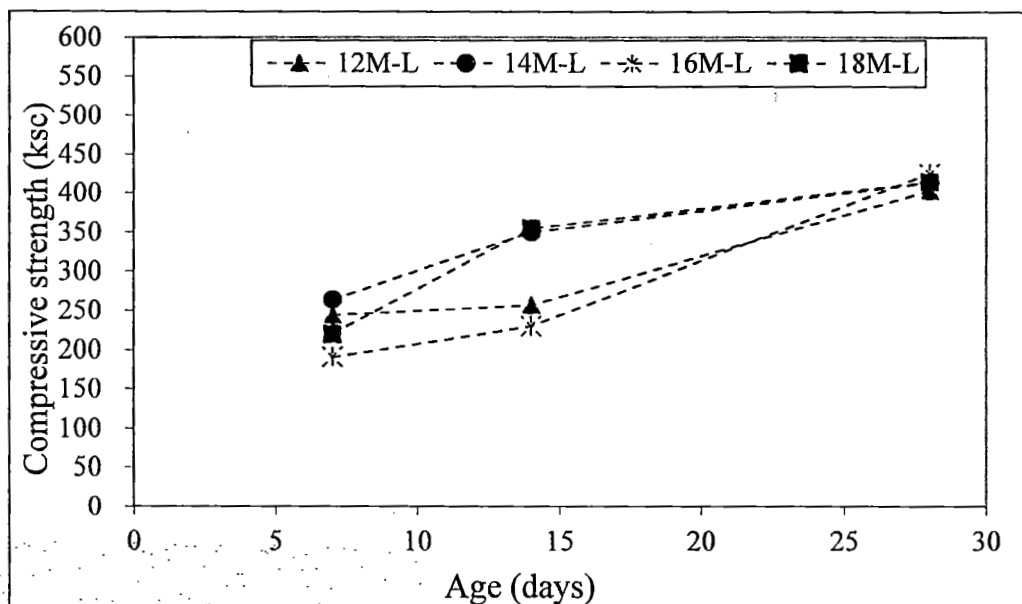


ก) หินฝุ่นปริมาณ S





ข) หินฝุ่นปริมาณ M



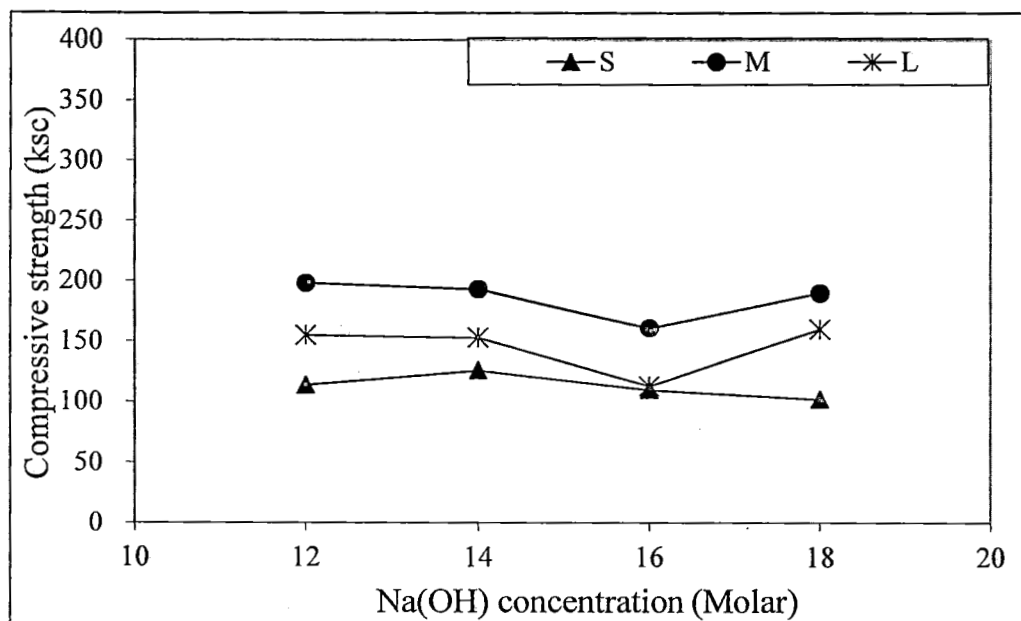
ค) หินฝุ่นปริมาณ L

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถาถ่านหินที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ.

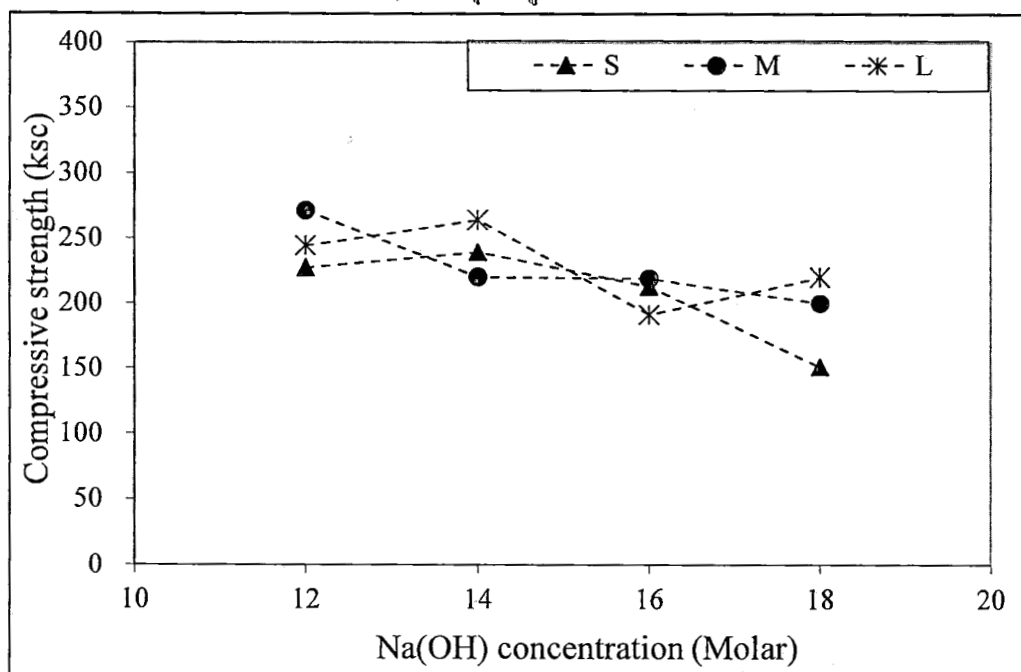
#### 4.2.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 7 วัน ที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ. ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ความ

เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มนเดียวกันทั้งกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°C. ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ยังไม่สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินได้สมบูรณ์ในช่วงอายุใดๆ จึงทำให้มีปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงเหลืออยู่ในส่วนผสม โดยลักษณะของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะล้นทำให้เกิดการสูญเสียการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ จึงทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีค่าต่ำลงในช่วงอายุต้นได้ เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน ที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°C. ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ก) และ 4.5(ข) ตามลำดับ กลับพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 214 251 309 และ 338 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น อาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินได้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ (Hanjitsuwan *et al.*, 2014 ; Palomo *et al.*, 1999) อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) พบว่า การชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง (สูงมากกว่า 15 โมลาร์) ซึ่งอาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมาก มีความหนืดมากขึ้นและส่งผลให้การชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินได้ยากขึ้น นอกจากนั้นกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ยังขึ้นกับการอัดตัวเชิงกลของบล็อกคอนกรีตที่ส่งผลให้วัสดุประสานและมวลรวมมีการอัดตัวกันแน่นขึ้น และส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตบล็อกสูงขึ้นอีกด้วย

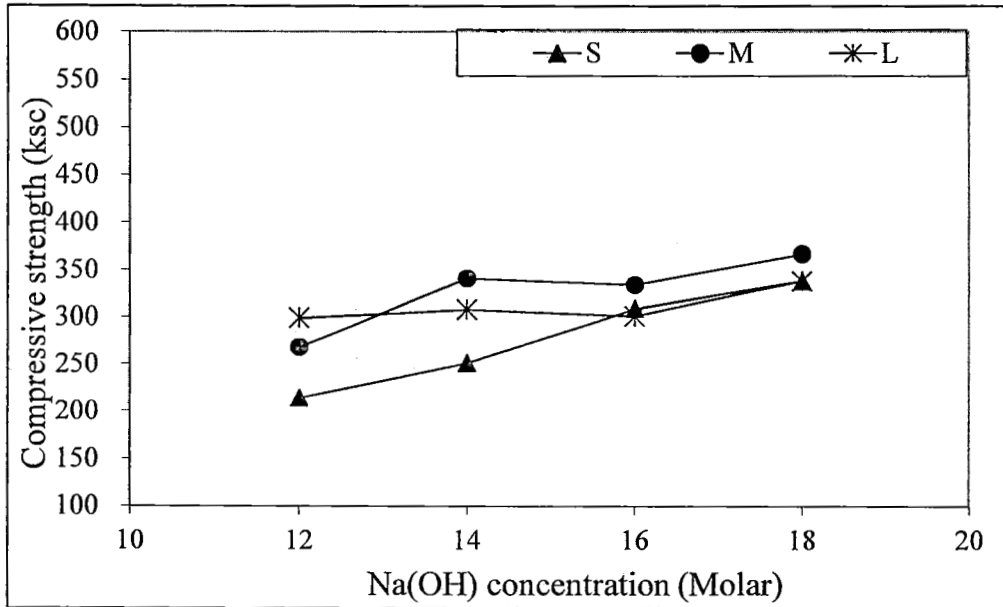


ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง

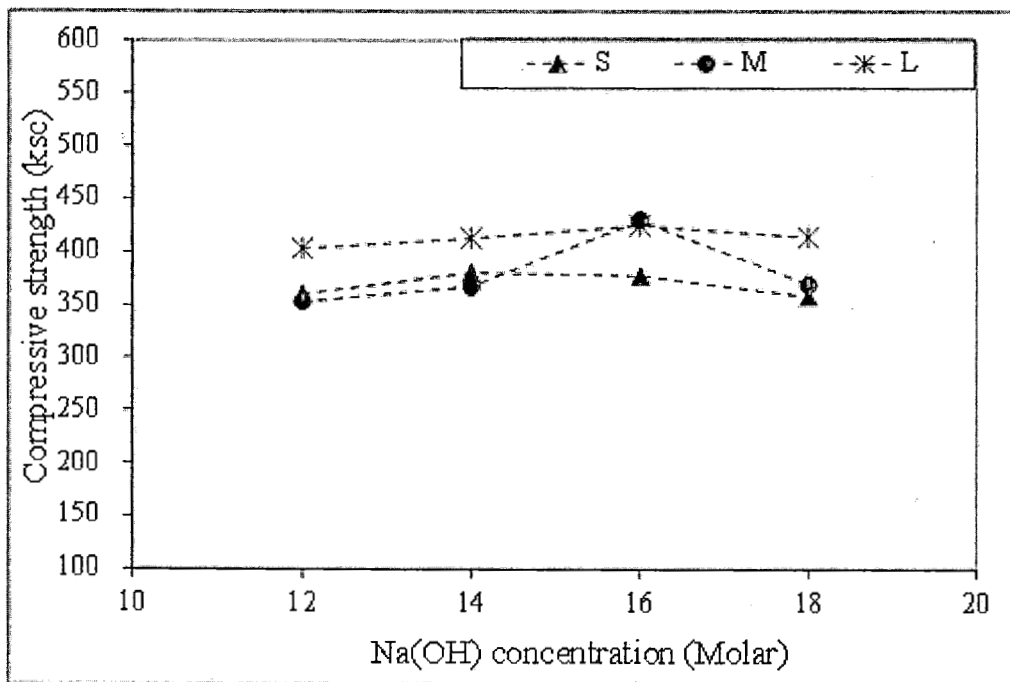


ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°C

รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์  
คอนกรีตบล็อกที่อายุ 7 วัน



ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ

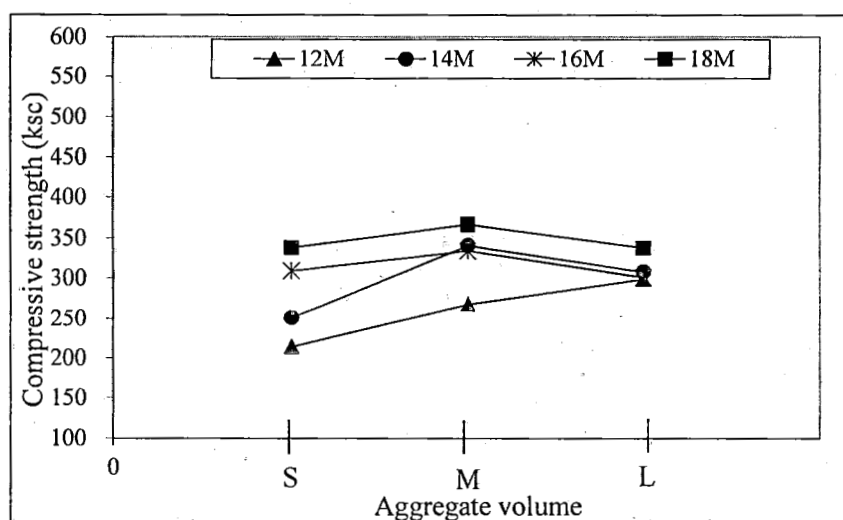
รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่อายุ 28 วัน

#### 4.2.3 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

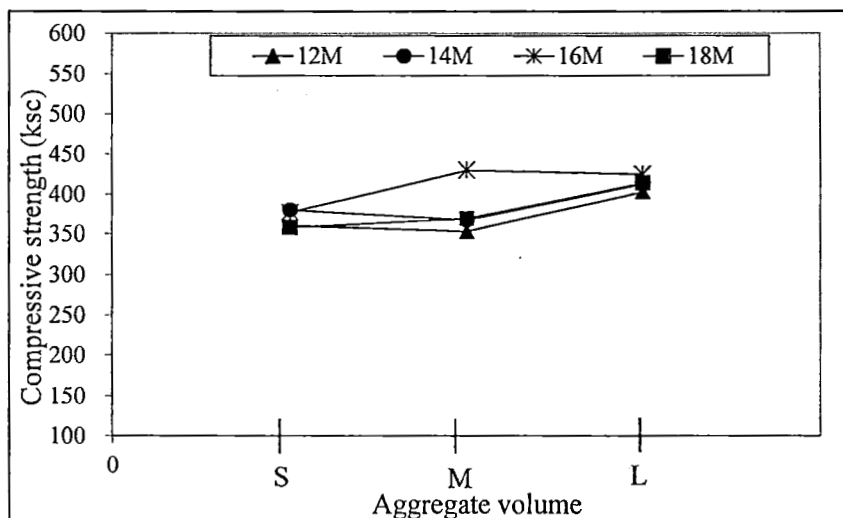
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค ที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ที่ อายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข) ตามลำดับ เมื่อ

พิจารณากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ  $M$  ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงสุด และกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปริมาณมวลรวมมากขึ้นเป็น  $L$  เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้ปริมาณของมวลรวม  $S$   $M$  และ  $L$  ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 251 341 และ 308 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้ปริมาณมวลรวมที่มากเกินไป ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกต่ำลง น่าจะเป็นผลจากหินฝุ่นที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของวัสดุประสาน ในส่วนผสมลดลง จึงมีผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวของมวลรวมมีน้อย ความแข็งแรงของคอนกรีตบล็อกจึงต่ำลงด้วย ขณะเดียวกันการใช้ปริมาณมวลรวมที่ต่ำเกินไป อาจทำให้มวลรวมที่มีความแข็งแรงที่ช่วยรับแรงอัดมีปริมาณน้อยลง จึงทำให้การรับแรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลงได้ การรับแรงของคอนกรีตบล็อกเป็นไปในสองลักษณะ คือ ผลของการอัดตัวของมวลรวม (packing effect) กับผลจากการยึดเกาะของวัสดุประสาน (Tangpagasit et al., 2005) ซึ่งขึ้นกับสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ดังนั้น การใช้มวลรวมที่มีปริมาณสูงมากไปการยึดประสานก็ต่ำลง มีผลให้กำลังอัดต่ำลงได้ หรือการมวลรวมที่มีปริมาณน้อยไปอาจส่งผลต่อการอัดตัวของคอนกรีตบล็อกที่มีมวลรวมน้อยไป ก็จะต้านการรับแรงเชิงกลได้ต่ำลง (Joseph and Mathew, 2012)

เมื่อพิจารณากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิ 65°C พบว่าการใช้มวลรวมที่มีปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้ม ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากเพสต์ที่เกิดจากการบ่มที่อุณหภูมิสูงมีคุณภาพดี จึงส่งผลให้การยึดเกาะได้ดีขึ้น ถึงแม้มวลรวมจะมีปริมาณสูง นอกจากนี้ความแข็งแรงของคอนกรีตบล็อก ไม่ได้มีปัญหาที่จุดยึดประสานระหว่างมวลรวมกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณมวลรวมที่มีความแข็งแรง จะช่วยให้คอนกรีตบล็อกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการอัดตัวของมวลรวม



ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ

รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน

#### 4.2.4 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของคอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S M และ L ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิในการบ่มคอนกรีตบล็อกที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความเข้มข้นของ NaOH และทุกกลุ่มของปริมาณมวลรวมหยาบที่ต่างกัน การที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก เป็นผลจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น (Sarker et al., 2013 ; Chindaprasirt et al., 2013)

พิจารณาประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (Effective curing temperature) ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกตามสมการที่ (1)

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

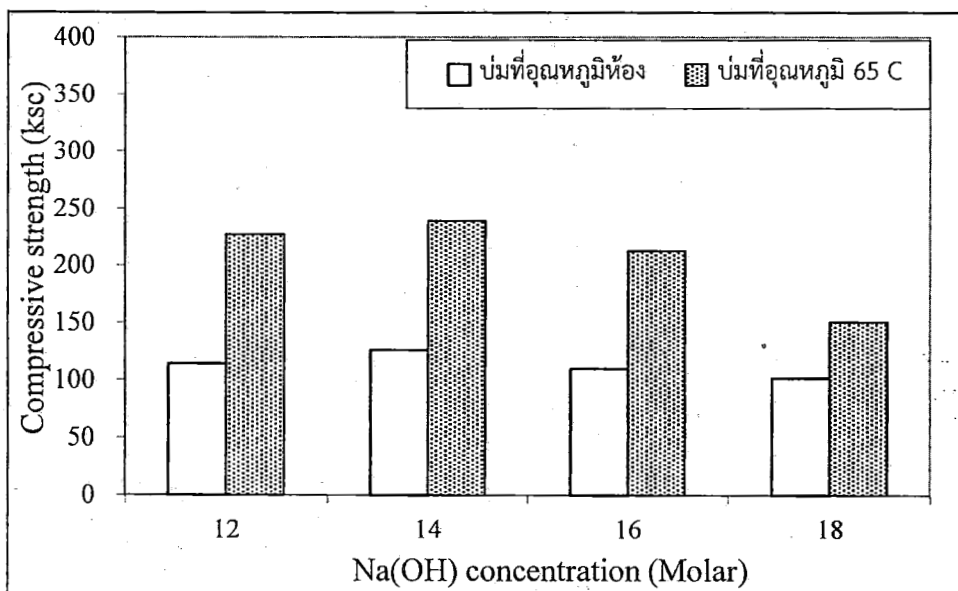
เมื่อ  $E_T$  = ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (ร้อยละ)

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

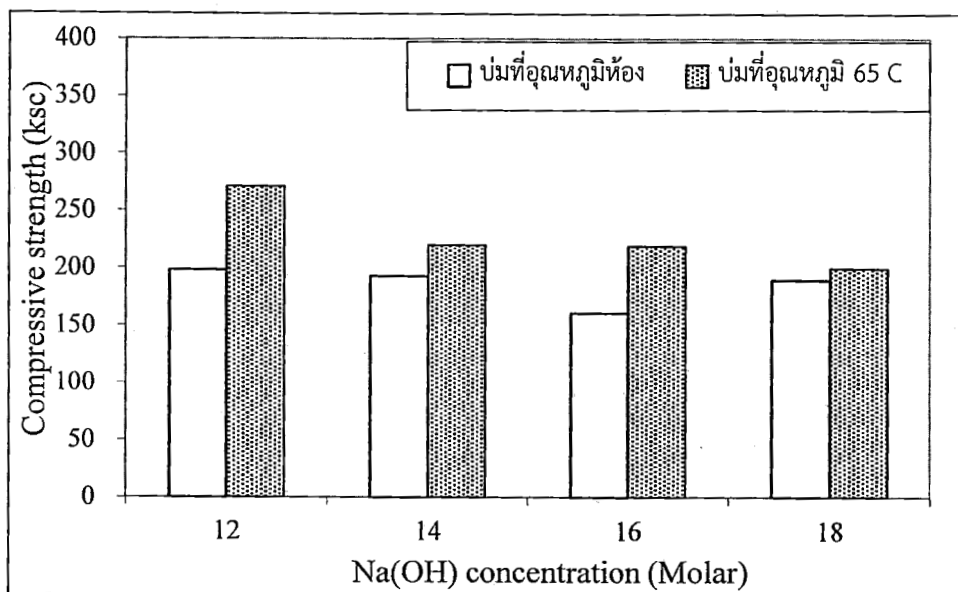
$C_R$  = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (กก/ซม<sup>2</sup>)

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ที่ใช้มวลรวมปริมาณ S ที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.9 พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์

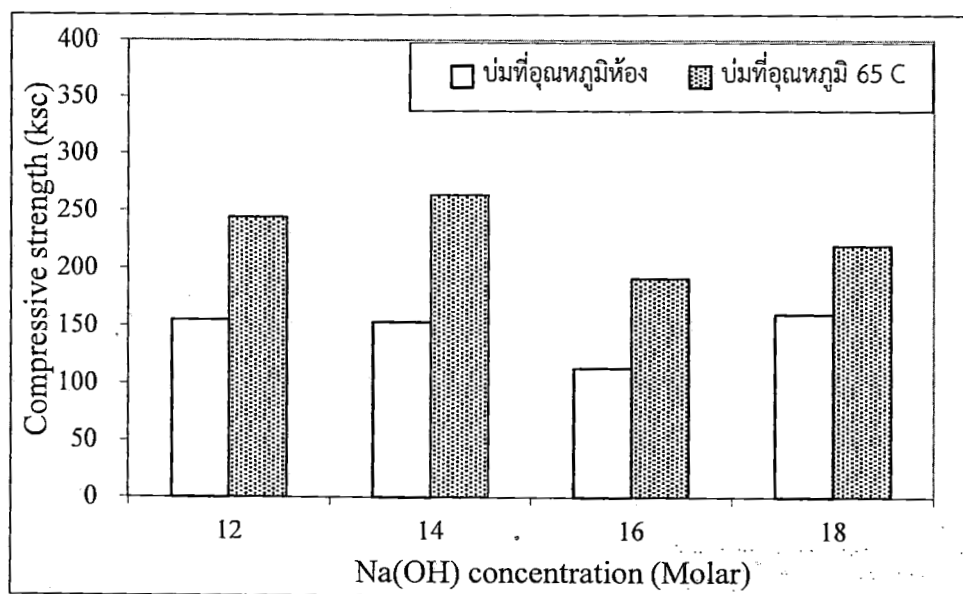
คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิมบที่อายุ 28 วัน เท่ากับ ร้อยละ 68.2 51.6 22.0 และ 5.9 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิมบที่สูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง การที่อุณหภูมิมบสูงขึ้นไปมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำลง น่าจะเป็นผลมาจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินได้มาก และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดสูงได้ในอุณหภูมิมบที่ห้องอยู่แล้ว (Hanjitsuwan *et al.*, 2014 ; Palomo *et al.*, 1999) โดยไม่จำเป็นต้องกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิมบที่สูงขึ้น ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ จะมีปริมาณของซิลิกาและอลูมินาที่ถูกชะจากเถ้านหินลดลง ดังนั้นการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันโดยใช้อุณหภูมิมบที่สูงขึ้น จึงมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มนี้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้อุณหภูมิมบที่สูงขึ้น มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในช่วงอายุต้นๆ (7 วัน) มากกว่าอายุที่นานขึ้น (28 วัน) ทั้งนี้เนื่องจากการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันโดยใช้อุณหภูมิมบที่สูงดังกล่าว เกิดขึ้นในช่วงอายุต้นๆ ของการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก (Chindaprasirt *et al.*, 2013)



ก) ปริมาณมวลรวม S



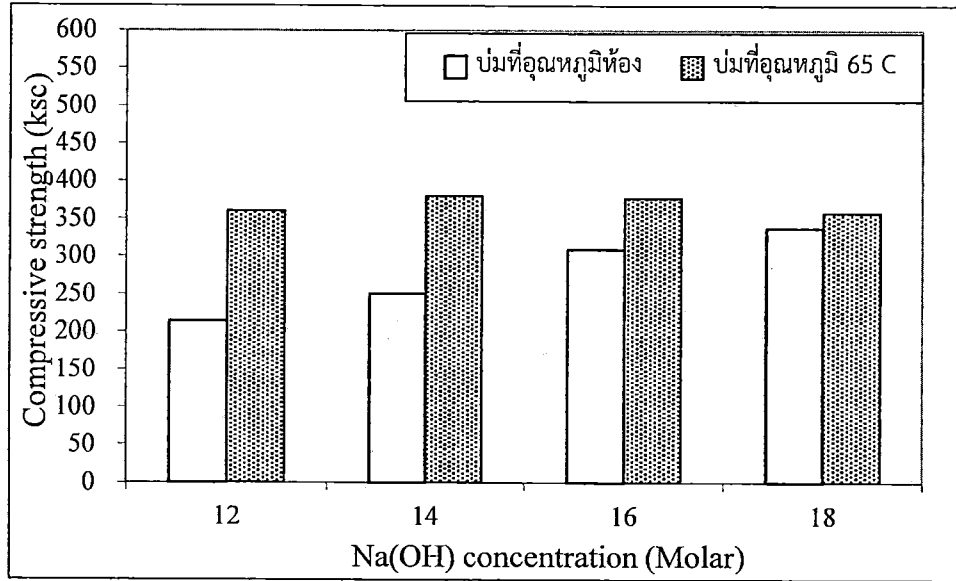
ข) ปริมาณมวลรวม M



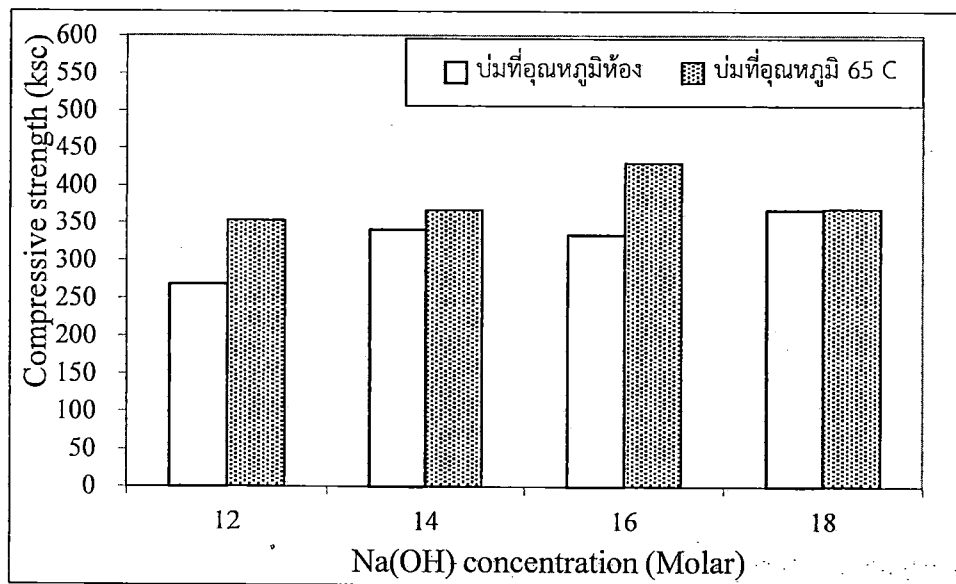
ค) ปริมาณมวลรวม L

รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดสัอกที่อายุ 7 วัน

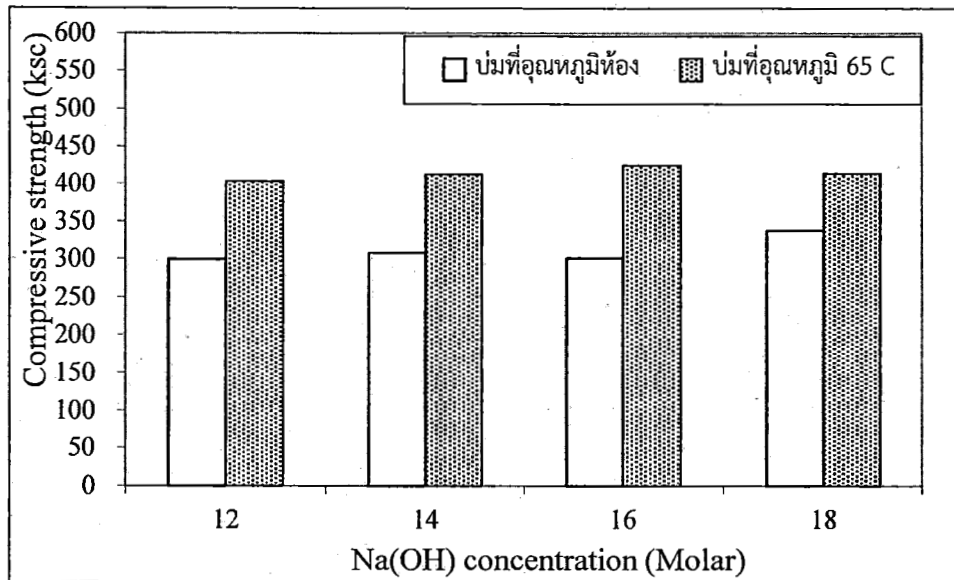




ก) ปริมาณมวลรวม S

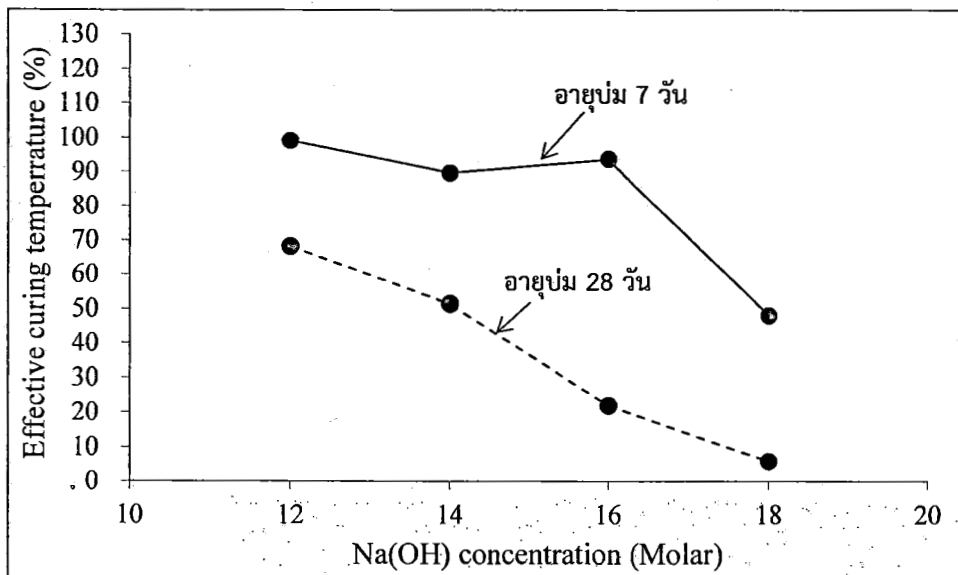


ข) ปริมาณมวลรวม M



ค) ปริมาณมวลรวม L

รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกที่อายุ 28 วัน



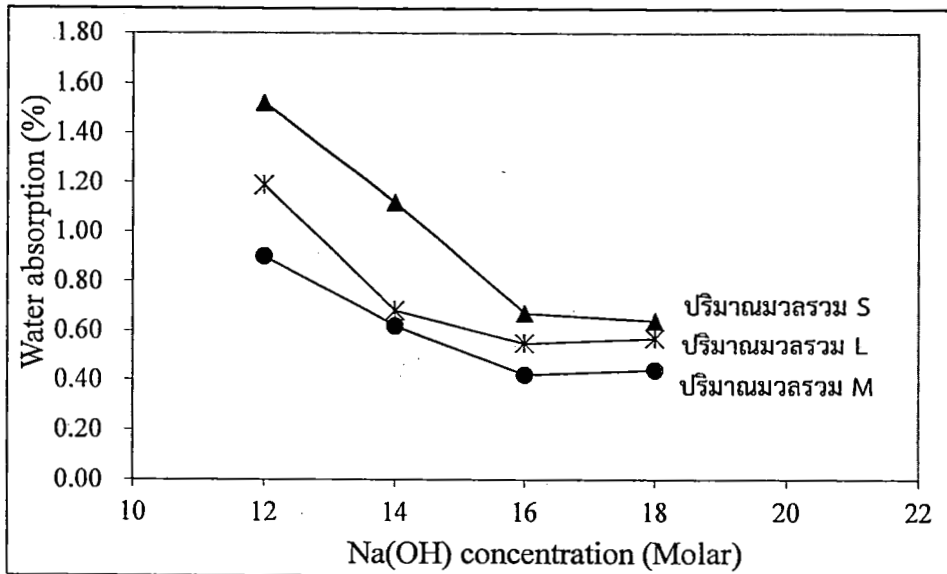
รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S ที่อายุ 7 และ 28 วัน

#### 4.3 การดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อก

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อก ในกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.10 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกต่ำลง และให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันในปริมาณหินฝุ่นทั้ง 3 กลุ่ม เช่น การใช้มวลรวมปริมาณ S ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อก

ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง ให้การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.52 1.12 0.67 และ 0.64 ตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง โดยความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงขึ้นส่งผลให้ชะเอาซิลิกาและอลูมินาที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันได้ดี และทำให้มีการยึดเกาะที่ดี ส่งผลให้ความพรุนระหว่างเพสต์กับมวลรวมหยาบน้อยลง จึงทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลงด้วย จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจึงมีการดูดซึมน้ำต่ำลงด้วย

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมวลรวม S M และ L ต่อการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกของกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.10) พบว่า การเพิ่มปริมาณมวลรวมจาก S เป็น M มีแนวโน้มให้การดูดซึมน้ำลดลงและมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมเป็น L เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 โมลาร์ และใช้หินฝุ่นปริมาณ S, M และ L หลังบ่มในอุณหภูมิห้องที่อายุ 28 วัน ให้การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.52 0.90 และ 1.19 ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการใช้มวลรวมที่มีปริมาณน้อย (S) ส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตบล็อกขึ้นกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ตลอดจนช่องว่างระหว่างมวลรวมมีมากขึ้น จึงทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าสูงและเป็นที่น่าสังเกตว่า การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ค่อนข้างชัดเจนกว่ากลุ่มอื่น แต่เมื่อใช้ปริมาณมวลรวมขึ้นเป็น M กลับพบว่า การดูดซึมน้ำต่ำลง จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่บ่มน้ำมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณมวลรวมดังกล่าวเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการแทรกตัวและลดช่องว่างในมวลรวม ส่วนการใช้มวลรวมสูงขึ้นเป็น L พบว่า การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากปริมาณมวลรวมมากเกินไป ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพสต์ลดลง จึงมีผลให้การดูดซึมน้ำสูงขึ้น ตลอดจนมวลรวมอาจมีการดูดน้ำเองด้วย โดยผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในครั้งนี้ สอดคล้องกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสูงขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง



รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์  
คอนกรีตบดอัดที่อายุ 28 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาตลอดโครงการวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- 5.1.1 การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง
- 5.1.2 การใช้อัตราส่วนระหว่าง ใต้อ่างหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกมีค่าสูงสุดทั้งกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°C
- 5.1.3 การใช้อุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกสูงขึ้น โดยอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของ NaOH สูง
- 5.1.4 การศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์ของคอนกรีตบดล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และอัตราส่วนระหว่าง ใต้อ่างหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก ให้ผลดีต่อสมบัติจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกชนิดรับน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจากการรับแรงเชิงกลที่ดีควบคู่กับการดูดซึมน้ำต่ำ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรศึกษาการทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของใต้อ่างหินและสารเคมีผสมเพิ่มชนิดต่างๆ
- 5.2.2 ควรศึกษาการทำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ เช่น ใต้อ่างปลา ใต้อ่างปลาเปลือกไม้ ใต้อ่างปลาน้ำมัน ใต้อ่างปลา และ ดินขาว เป็นต้น
- 5.2.3 ควรมีการส่งเสริมการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกให้สามารถใช้งานได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม เช่น ทำการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบดล็อกในโรงงาน และนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริง

## เอกสารอ้างอิง

- ชรินทร์ เสนาวงษ์ อธิธิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี. (2552). การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจาก  
 ใต้กันตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14*, 13-15  
 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 1587-1592.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี. (2553). กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิ  
 เมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหิน, *Burapha Sci.*, J.15 (1), 13-22.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต, ครั้งที่ 3,  
 สมาคมคอนกรีตไทย
- ยูดี หิรัญ. (2551). การอัดบล็อกปูถนนคอนกรีตพูน. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4*, 20-22  
 ตุลาคม พ.ศ. 2551, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม. (2555). การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์  
 คอนกรีตจากเถาถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 35(2),  
 157-170.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, (2547). มาตรฐาน  
 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 57-2533 คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก. พิมพ์ครั้งที่ 7, สำนักงาน  
 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, (2547). มาตรฐาน  
 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 58-2533 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก. พิมพ์ครั้งที่ 7, สำนักงาน  
 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.
- สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ จตุพล ตั้งปกาศิต ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2546). การศึกษาคอนกรีตที่มีเถาเกลบ-เปลือกไม้  
 เป็นส่วนผสม. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*, 14(3), 1-7.
- สมิตร สงพิริยะกิจ และวรเชษฐ ป้อมเชียงพิณ. (2552). จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถาถ่านหินแม่เมาะ. *การ  
 ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม  
 2552, หน้า 1831-1836.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ ชาญชัย พลตรี และ วิเชียร ชาลี. (2548). การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ จีโอพอ  
 ลิเมอร์จากเถาถ่านหิน. *การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10*, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรม  
 แอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ วิเชียร ชาลี และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). การศึกษาการชะเถาถ่านหินลิคนินต์  
 และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถาถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 29(4), 437-446.

- Anurag, M., Deepika, C., Namrata, J., Manish, K., Nidhi, S., & Durga, D., (2008). Effect of concentration of alkali liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete. *Eng Appl Sci*, 3, 14-18.
- ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01*.
- ASTM C127-88. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01*.
- ASTM C642-97. (2001). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01*.
- Bakharev, T., (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35, 1224-1232.
- Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., & Rattanasak, U., (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, 29, 539-543.
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., & Taebuanhuad, S., (2013). Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Materials and Structures*, 46, 375-381.
- Davidovits, J., (1991). Geopolymer inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal*, 37, 1633-1659.
- Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, & Young Soo Chung., (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409-418.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P., (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.
- Huajun Zhu, Zuhua Zhang, Fenggan Deng, & Yalong Cao., (2013). The effects of phase changes on the bonding property of geopolymer to hydrated cement. *Construction and Building Materials*, 48, 124-130.
- Joseph, B., & Mathew, G., (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Scientia Iranica A* 19, 1188-1194.
- Palomo, A., Grutzeck, MW., & Blanco, MT., (1999). Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P., (2009). Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng*, 22, 1073-1078.

- Sarker, K., AHaque, R., & Ramgolam, K., (2013). Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete. *Materials and Design*, 44, 580-586.
- Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C., & Chindapasirt P., (2010) Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24, 236-240.
- Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K., (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Construction and Building Materials*, 35, 1145-1151.
- Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., & Chindapasirt, P., (2010). Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials and Design* 3, 4748-4754.



## ภาคผนวก ก

### ผลผลิต (Output)

#### บทความวิจัยที่ส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) Panha Huy, Soklam Mov, วิเชียร ชาลี “การผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเต้าถ่านหิน”, *Burapha Sci* (Submitted paper)



## บันทึกข้อความ

ส่วนงาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทร. ๓๓๕๖

ที่ ศธ ๖๖๑๙.๕/

วันที่ ๘ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๕๗

เรื่อง ขอส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

เรียน กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

ข้าพเจ้า นายวิเชียร ชาลี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา มีความประสงค์จะส่ง บทความวิจัยเรื่อง “การผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน” โดยผู้เขียน นาย Panha Huy นาย Soklam Mov และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี เพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

หากผลการพิจารณาบทความดังกล่าวเป็นประการใด โปรดแจ้งให้คณะผู้เขียนทราบด้วยจะเป็นพระคุณยิ่ง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาและดำเนินการต่อไป จักเป็นพระคุณยิ่ง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร ชาลี)

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา

1 การผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน

2 Utilization of fly ash-based geopolymer in hollow load-bearing concrete masonry  
3 blocks

4 Panha Huy, Soklam Mov, วิเชียร ชาลี \*

5 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6 Panha Huy, Soklam Mov, Wichian Chalee \*

7 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

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

9  
10 บทคัดย่อ

11 งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณมวลรวม ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอุณหภูมิบ่ม ต่อกำลัง  
12 อัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิ  
13 เมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่ง  
14 กำหนดอัตราส่วนโดยโมลาร์ระหว่าง  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
15 เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมในส่วนผสมในอัตราส่วน เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ  
16 1:4 (S) 1:6 (M) และ 1:8 (L) โดยน้ำหนัก เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวา-แรม  
17 หลังจากนั้นบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอากาศที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ  $65^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชม.  
18 และบ่มต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 7 14 และ  
19 28 วัน ตลอดจนทดสอบการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุทดสอบ 28 วัน

20 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิ  
21 เมอร์คอนกรีตบล็อกมากขึ้น การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์บล็อกลดลงเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น ปริมาณมวลรวมใน  
22 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่มากขึ้นไม่เกินปริมาณ M (เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6) ให้กำลังอัด  
23 สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้มวลรวมในส่วนผสมสูงถึงปริมาณ L (เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น  
24 เท่ากับ 1:8) นอกจากนั้นพบว่า อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์  
25 คอนกรีตบล็อกในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของ NaOH สูง

26  
27  
28 คำสำคัญ: เถ้าถ่านหิน, จีโอพอลิเมอร์, คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก, กำลังอัด, ความเข้มข้นของสารละลาย

29 NaOH

30  
31  
32  
33  
34

35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67

### Abstract

This research aimed to study the effect of aggregate content, sodium hydroxide (NaOH) concentrations and curing temperature on compressive strength and water absorption of geopolymer concrete masonry block. The geopolymer concrete block were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The molar ratio of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  was kept constant and concentration of NaOH was varied at 12, 14, 16, and 18 molar. The ratio of 1:4 (S), 1:6 (M) and 1:8 (L) by weight of fly ash : dust limestone were used as a aggregate. The geopolymer concrete block were prepared by using the Cinva-Ram machine. The samples were air cured at room temperature and  $65^\circ\text{C}$  for 24 hours and continuous curing until the age test in air. The geopolymer concrete block was tested for compressive strength at 7, 14, and 28 days air cure. In addition, water absorption of geopolymer concrete block was tested at 28 days.

The results showed that the compressive strength of geopolymer concrete block increase with the increase in NaOH concentration and curing temperature. The water absorption of geopolymer concrete block is low with the concrete of high compressive strength. An increase in amount of aggregate as high as M (the ratio of 1:6 by weight of fly ash : dust limestone) result in increased compressive strength; however, the compressive strength was found to decrease when using high amount of aggregate L (the ratio of 1:8 by weight of fly ash : dust limestone). In addition, high temperature curing has more effective on increasing of compressive strength in geopolymer concrete block with lower NaOH concentration than that with higher NaOH concentration.

**Keywords:** fly ash, geopolymer, load-bearing concrete masonry blocks, compressive strength, sodium hydroxide concentration

## บทนำ

68

69 คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หินขนาดเล็ก และน้ำ ผสมให้เข้ากันดี  
 70 แล้วอัดในแบบเหล็กให้แน่นและบ่มในอากาศจนมีความแข็งตัวพอที่จะนำไปใช้ในการก่อสร้างได้ คอนกรีต  
 71 บล็อกมีทั้งแบบรับน้ำหนัก (load-bearing concrete masonry blocks) และไม่รับน้ำหนัก (concrete  
 72 masonry blocks) ซึ่งมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม  
 73 (มอก. 57-2533) ได้กำหนดให้คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักต้องสามารถรับน้ำหนักได้ไม่ต่ำกว่า 110 กก/ซม<sup>2</sup>  
 74 ส่วนคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 58-  
 75 2533) ได้กำหนดให้รับน้ำหนักได้ไม่ต่ำกว่า 25 กก/ซม<sup>2</sup> การใช้งานคอนกรีตบล็อกในอุตสาหกรรมก่อสร้างมี  
 76 มากขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่ก่อสร้างได้ง่าย โดยคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้  
 77 ในระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นการก่อสร้างใช้งานจึงเหมาะสมกับอาคารหรือสิ่งก่อสร้างขนาดเล็ก ซึ่งไม่มีความ  
 78 ซับซ้อนของการรับแรงเชิงกลของโครงสร้าง

79 แนวคิดของการผลิตคอนกรีตโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม เริ่มจากการใช้สารปอซโซลานที่  
 80 ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และ  
 81 เร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีความรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน  
 82 เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al.*, 2009 ; Chindapasirt *et al.*,  
 83 2009) ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา และอะลูมินา ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ใน  
 84 ลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง  
 85 โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้ และปัจจุบันพบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์  
 86 สามารถทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้ในอุณหภูมิปกติ (Ambient Temperature) โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการช่วย  
 87 เร่งปฏิกิริยาอีกต่อไป (Davidovits, 1991) โดยงานวิจัยที่ผ่านมา (Huajun *et al.*, 2013 ; Gum Sung  
 88 Ryu *et al.*, 2013 ; Anurag *et al.*, 2008 ; Chindapasirt *et al.*, 2009) ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มี  
 89 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น ลักษณะของการบ่ม ความเข้มข้นของด่าง และชนิดของวัสดุปอซ  
 90 โซลาน เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาโดยภาพรวม พบว่า การใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นสามารถหะเอาซิลิกาและ  
 91 อลูมินาจากวัสดุปอซโซลานได้ดี และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ดีขึ้น ตลอดจนการบ่มวัสดุจีโอ  
 92 พอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่เกิน 90 °C เป็นเวลาไม่เกิน 48 ชม. ก็ส่งผลดีต่อการรับแรงเชิงกลของวัสดุจีโอ  
 93 พอลิเมอร์อีกด้วย

94 สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการใช้งานคอนกรีตที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในอุตสาหกรรม  
 95 ก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขาดความมั่นใจในการนำมาใช้งาน เพราะมีฐานข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยที่น้อย  
 96 เกินไป และยังไม่เกิดปัญหาขาดแคลนปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามแนวการส่งเสริมเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่าง  
 97 จริงจังในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ควรเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เป็นประโยชน์และเพิ่มความมั่นใจในการใช้  
 98 งานให้มากขึ้น โดยเริ่มจากการใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตที่มีความซับซ้อนไม่มาก และมีลักษณะการรับแรง  
 99 เชิงกลที่ไม่เสี่ยงต่อการวิบัติและก่อให้เกิดอันตราย เช่น คอนกรีตบล็อกหรือวัสดุงานก่อผนังหรือโครงสร้างง่ายๆ  
 100 เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก

101 น้ำหนัก (load-bearing concrete masonry blocks) จากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหิน โดยไม่ใช้  
 102 ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่ได้ใช้เถ้านหินที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาเถ้านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้าในการทำ  
 103 วัสดุประสานแทน โดยมุ่งประเด็นไปที่ผลของปริมาณของมวลรวมหยาบ อุณหภูมิที่ใช้บ่มและความเข้มข้นของ  
 104 โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัด และการดูดน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก เพื่อเพิ่มฐานข้อมูลการ  
 105 วิจัยที่น่าเชื่อถือประกอบการใช้งานให้มั่นใจยิ่งขึ้น

## 107 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 109 วัสดุ

110 วัสดุประสานได้ใช้เถ้านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ  
 111 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่  
 112 เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหิน  
 113 แม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 70.91 และมีค่า LOI ร้อยละ  
 114 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหิน  
 115 แสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตบล็อก  
 116 ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งอัตราส่วน  $\text{SiO}_2$  ต่อ  $\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก  
 117 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 12, 14, 16  
 118 และ 18 โมลาร์ มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้หินฝุ่นที่มีความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่  
 119 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127-88 เท่ากับ 2.67 และร้อยละ 9.58 ตามลำดับ

### 120 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

121 งานวิจัยนี้จะศึกษาการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหิน โดย  
 122 เตรียมจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)  
 123 ซึ่งกำหนดอัตราส่วนโดยโมลาร์ระหว่าง  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอก  
 124 ซไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ และใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมในสัดส่วนที่ต่างกัน 3 ขนาด โดยใช้อัตราส่วน  
 125 เถ้านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:4(S) 1:6(M) และ 1:8(L) โดยน้ำหนัก โดยมีส่วนผสมทั้งหมด 12 ส่วนผสมตาม  
 126 ตารางที่ 2 ทำการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวาแรมดงภาพที่ 1(ก) และบ่มจีโอ  
 127 พอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอากาศที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 65 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นใช้พลาสติก  
 128 ใสพันรอบไว้และบ่มต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

### 129 การทดสอบกำลังอัด

130 เมื่อครบกำหนดทดสอบทำการตัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด  
 131  $50 \times 50 \times 50$  มม<sup>3</sup> ดังภาพที่ 1(ข) เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัด (เฉลี่ยจาก 3 ก้อน) ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

132

133

### 134 ทดสอบการดูดซึมน้ำ

135 ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ (absorption test) ตามมาตรฐาน ASTM C642-97 ได้ตัดตัวอย่าง  
 136 คอนกรีตบล็อก ให้มีขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มม.<sup>3</sup> นำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ  $100 - 110$  °ซ  
 137 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและแช่ตัวอย่างคอนกรีตบล็อกให้จมอยู่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ว  
 138 ใช้ผ้าเช็ดให้แห้งโดยรอบอย่างรวดเร็ว และชั่งน้ำหนัก ภายใน 5 นาที คำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต  
 139 บล็อก จากน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตบล็อกหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง ลบด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อกที่อบแห้ง  
 140 หารด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อกที่อบแห้งทั้งหมดคูณด้วย 100 โดยทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน

### 141 142 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

#### 143 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

144 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ  
 145 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง และ บ่มในอุณหภูมิ  $65^{\circ}$ ซ ดังตารางที่ 3 พบว่า ทุกส่วนผสมมี  
 146 การพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ความเข้มข้นของสารละลาย  
 147 โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ บ่มในอุณหภูมิห้อง และหินปูนที่ปริมาณ S M และ L มีกำลังอัดที่อายุ  
 148 7 วัน เท่ากับ 114 198 และ 155 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ และมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 214 268 และ  
 149 299 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 150 บล็อก ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิ  $65^{\circ}$ ซ และ หินปูน  
 151 ที่ปริมาณ S M และ L มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 227 271 และ 244 กก/ซม<sup>2</sup> และมีการพัฒนากำลังอัด  
 152 เพิ่มขึ้นเป็น 360 353 และ 403 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัด  
 153 ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน โดยภาพรวม  
 154 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ มีแนวโน้มให้ร้อยละของ  
 155 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเข้มข้นของ  
 156 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปริมาณ  
 157 มวลรวม M และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มใน  
 158 อุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ  $65^{\circ}$ ซ มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน เท่ากับ 135.4  
 159 176.7 207.5 193.2 และ 130.3 166.8 196.3 184.4 ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 160 บล็อกมีการพัฒนาสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชัน ปฏิกิริยานี้เป็นการทำ  
 161 ปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมาก  
 162 ขึ้น ทำให้เกิดการอัดตัว เพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ทำให้จีโอพอลิ  
 163 เมอร์คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดสูงขึ้น (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al.*, 2009 ; Chindaprasirt  
 164 *et al.*, 2009) เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกต่อการพัฒนากำลังอัดของจี  
 165 โอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก พบว่า การบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอุณหภูมิห้องมีการพัฒนากำลังอัดใน

167 รูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน สูงกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิ 65° ซ และเป็นแนวโน้ม  
 168 เดียวกันทุกส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65° ซ เป็นการบ่ม  
 169 ในช่วงอายุต้นๆ ซึ่งทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันในช่วงต้นให้เร็วขึ้น (Sarker et al., 2013 ;  
 170 Chindaprasirt et al., 2013) จึงส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มนี้มีค่าสูงที่อายุต้นๆ  
 171 แล้ว และมีผลให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง

172

173 **ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก**

174 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์  
 175 คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน ที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ. ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) และ 2(ข)  
 176 ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลาย  
 177 โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S และใช้ความเข้มข้นของ  
 178 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน  
 179 เท่ากับ 214 251 309 และ 338 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก  
 180 ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น อาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 181 ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิ  
 182 เมอร์ไรท์เซชันได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ (Hanjitsuwan et al.,  
 183 2014 ; Palomo et al., 1999) อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549)  
 184 พบว่า การชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  
 185 โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง (สูงมากกว่า 15 โมลาร์) ซึ่งอาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความ  
 186 เข้มข้นสูงมาก มีความหนืดมากขึ้นและส่งผลให้การชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้ยากขึ้น  
 187 นอกจากนี้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ยังขึ้นกับการอัดตัวเชิงกลของบล็อกคอนกรีตที่ส่งผลให้  
 188 วัสดุประสานและมวลรวมมีการอัดตัวกันแน่นขึ้น และส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตบล็อกสูงขึ้นอีกด้วย

189

190 **ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก**

191 เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง  
 192 และบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ที่ อายุ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ เมื่อพิจารณากลุ่มที่บ่ม  
 193 ในอุณหภูมิห้อง พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ M ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิ  
 194 เมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงสุด และกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้  
 195 ปริมาณมวลรวมมากขึ้นเป็น L เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอก  
 196 ไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้ปริมาณของมวลรวม S M และ L ให้กำลังอัดที่อายุ  
 197 28 วัน เท่ากับ 251 341 และ 308 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้ปริมาณ  
 198 มวลรวมที่มากเกินไป ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกต่ำลง น่าจะเป็นผลจากหินฝุ่นที่มากขึ้น  
 199 ส่งผลให้ปริมาณของวัสดุประสาน ในส่วนผสมลดลง จึงมีผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวของมวลรวมมีน้อย ความ



200 แข็งแรงของคอนกรีตบล็อกจึงต่ำลงด้วย ขณะเดียวกันการใช้ปริมาณมวลรวมที่ต่ำเกินไป อาจทำให้มวลรวมที่มี  
 201 ความแข็งแรงที่ช่วยรับแรงอัดมีปริมาณน้อยลง จึงทำให้การรับแรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลงได้  
 202 การรับแรงของคอนกรีตบล็อกเป็นไปในสองลักษณะคือ ผลของการอัดตัวของมวลรวม (packing effect) กับ  
 203 ผลจากการยึดเกาะของวัสดุประสาน (Tangpagasit et al., 2005) ซึ่งขึ้นกับสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์  
 204 ดังนั้น การใช้มวลรวมที่มีปริมาณสูงมากไปการยึดประสานก็ต่ำลง มีผลให้กำลังอัดต่ำลงได้ หรือการมวลรวมที่มี  
 205 ปริมาณน้อยไปอาจส่งผลต่อการอัดตัวของคอนกรีตบล็อกที่มีมวลรวมน้อยไป ก็จะทำให้การรับแรงเชิงกลได้  
 206 ต่ำลง (Joseph and Mathew, 2012)

207 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่บ่มในอุณหภูมิ 65 °ซ พบว่าการใช้มวลรวมที่มีปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้ม ให้กำลังอัด  
 208 ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากเพสต์ที่เกิดจากการบ่มที่อุณหภูมิสูงมี  
 209 คุณภาพดี จึงส่งผลให้การยึดเกาะได้ดีขึ้น ถึงแม้มวลรวมจะมีปริมาณสูง นอกจากนี้ความแข็งแรงของคอนกรีต  
 210 บล็อกไม่ได้มีปัญหาที่จุดยึดประสานระหว่างมวลรวมกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณมวลรวมที่มี  
 211 ความแข็งแรง จะช่วยให้คอนกรีตบล็อกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการอัดตัวของมวลรวม

#### 212 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

213 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดที่อายุ 28 ของคอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S M และ  
 214 L ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) 4(ข) และ 4(ค) ตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิในการบ่มคอนกรีตบล็อกที่สูงขึ้น ส่งผลให้  
 215 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความเข้มข้นของ NaOH และทุกกลุ่มของ  
 216 ปริมาณมวลรวมหยาบที่ต่างกัน การที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 217 บล็อก เป็นผลจากจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว  
 218 และสมบูรณ์มากขึ้น (Sarker et al., 2013 ; Chindapasirt et al., 2013)

219  
 220 พิจารณาประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (Effective curing temperature) ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์  
 221 คอนกรีตบล็อกตามสมการที่ (1)

$$222 \quad E_T = \frac{[(C_{65} - C_R) \times 100]}{C_R} \quad (1)$$

223 เมื่อ  $E_T$  = ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (ร้อยละ)

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

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

226  
 227 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม  
 228 ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ที่ใช้มวลรวมปริมาณ S ที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังภาพที่ 5 พบว่า การใช้ความ  
 229 เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์  
 230 คอนกรีตบล็อกลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 231 บล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ

232 18 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพของอนุกรมบ่มที่อายุ 28 วัน เท่ากับ ร้อยละ 68.2 51.6 22.0 และ 5.9  
 233 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้อนุกรมบ่มที่สูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 234 บล็อก ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง การที่อนุกรมบ่ม  
 235 สูงขึ้น มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  
 236 โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำลง น่าจะเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิ  
 237 ลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มาก และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์  
 238 คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดสูงได้ในอนุกรมบ่มที่สูงอยู่แล้ว (Hanjitsuwan *et al.*, 2014 ; Palomo *et al.*,  
 239 1999) โดยไม่จำเป็นต้องกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้อนุกรมบ่มที่สูงขึ้น ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่  
 240 มีความเข้มข้นต่ำ จะมีปริมาณของซิลิกาและอลูมินาที่ถูกชะจากเถ้าถ่านหินลดลง ดังนั้นการกระตุ้นให้  
 241 เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันโดยใช้อนุกรมบ่มที่สูงขึ้น จึงมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์  
 242 คอนกรีตบล็อกกลุ่มนี้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้อนุกรมบ่มที่สูงขึ้น มี  
 243 ประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในช่วงอายุต้นๆ (7 วัน) มากกว่าอายุที่นาน  
 244 ขึ้น (28 วัน) ทั้งนี้เนื่องจากการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันโดยใช้อนุกรมบ่มที่สูงดังกล่าว  
 245 เกิดขึ้นในช่วงอายุต้นๆ ของการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก (Chindaprasirt *et al.*, 2013)

246

#### 247 การดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

248 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์  
 249 คอนกรีตบล็อก ในกลุ่มที่บ่มในอนุกรมบ่มที่ 6 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความ  
 250 เข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกต่ำลง และให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันใน  
 251 ปริมาณหินปูนทั้ง 3 กลุ่ม เช่น การใช้มวลรวมปริมาณ S ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของ  
 252 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอนุกรมบ่มให้การดูดซึมน้ำเท่ากับ  
 253 ร้อยละ 1.52 1.12 0.67 และ 0.64 ตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มที่ใช้ความ  
 254 เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์กับ  
 255 มวลรวมต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง โดยความเข้มข้นของ NaOH ที่  
 256 สูงขึ้นส่งผลให้ชะเอาซิลิกาและอลูมินาที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชันได้ดี และทำให้มีการยึดเกาะ  
 257 ที่ดี ส่งผลให้ความพรุนระหว่างเพสต์กับมวลรวมหยาบน้อยลง จึงทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลงด้วย จีโอ  
 258 พอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจึงมีการดูดซึมน้ำต่ำลงด้วย

259 เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมวลรวม S M และ L ต่อการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก  
 260 ของกลุ่มที่บ่มในอนุกรมบ่ม (ภาพที่ 5) พบว่า การเพิ่มปริมาณมวลรวมจาก S เป็น M มีแนวโน้มให้การดูดซึมน้ำ  
 261 น้ำลดลงและมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมเป็น L เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้  
 262 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 โมลาร์ และใช้หินปูนปริมาณ S, M และ L หลังบ่มในอนุกรมบ่มที่อายุ  
 263 28 วัน ให้การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.52 0.90 และ 1.19 ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการใช้มวลรวม  
 264 ที่มีปริมาณน้อย (S) ส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตบล็อกขึ้นกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ตลอดจนช่องว่างระหว่าง

265 มวลรวมมีมากขึ้น จึงทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าสูงและเป็นที่น่าสังเกตว่า การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 266 บล็อกกลุ่มนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ค่อนข้างชัดเจนกว่ากลุ่มอื่น แต่เมื่อใช้ปริมาณมวลรวม  
 267 ขึ้นเป็น M กลับพบว่า การดูดซึมน้ำต่ำลง จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่บ่มน้ำมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณ  
 268 มวลรวมดังกล่าวเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการแทรกตัวและลดช่องว่างในมวลรวม ส่วนการใช้มวลรวมสูงขึ้น  
 269 เป็น L พบว่า การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากปริมาณมวลรวมมากเกินไป ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 270 เพสต์ลดลง จึงมีผลให้การดูดซึมน้ำสูงขึ้น ตลอดจนมวลรวมอาจมีการดูดน้ำเองด้วย โดยผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ  
 271 น้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในครั้งนี้ สอดคล้องกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกดังที่กล่าว  
 272 มาข้างต้น โดยกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสูงขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง

273

274

### สรุปผลการวิจัย

275

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

276

- 276 1. การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมี  
 277 กำลังอัดเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง
- 278 2. การใช้อัตราส่วนระหว่าง ใ้ถ้า่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิ  
 279 เมอร์คอนกรีตบล็อกมีค่าสูงสุดทั้งกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ
- 280 3. การใช้อุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสูงขึ้น โดยอุณหภูมิบ่ม  
 281 ที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้น  
 282 ของ NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของ NaOH สูง
- 283 4. การศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์ของคอนกรีตบล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮ  
 284 ดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และอัตราส่วนระหว่าง ใ้ถ้า่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก ให้  
 285 ผลดีต่อสมบัติจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจากให้การรับแรงเชิงกลที่ดี  
 286 ควบคู่กับการดูดซึมน้ำต่ำ

287

288

### กิตติกรรมประกาศ

289

290

291

292

293

294

295

296

297

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรับฝาก (เงินงบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัย  
 บурพา โครงการส่งเสริมการวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยสำนักงานคณะกรรมการการ  
 อุดมศึกษาประจำปีงบประมาณพ.ศ. 2557 (HERP)

## เอกสารอ้างอิง

- 298
- 299
- 300 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
- 301 มอก. 57-2533 คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก. พิมพ์ครั้งที่ 7, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
- 302 กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.
- 303 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
- 304 มอก. 58-2533 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก. พิมพ์ครั้งที่ 7, สำนักงานมาตรฐาน
- 305 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.
- 306 อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ วิเชียร ชาลี และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). การศึกษาการชะงักงันหินลิกันต์
- 307 และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 29(4), 437-446.
- 308 Anurag, M., Deepika, C., Namrata, J., Manish, K., Nidhi, S., & Durga, D., (2008). Effect of
- 309 concentration of alkali liquid and curing time on strength and water absorption of
- 310 geopolymer concrete. *Eng Appl Sci*, 3, 14-18.
- 311 ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural
- 312 Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of*
- 313 *ASTM Standards; V. 04.01.*
- 314 ASTM C127-88. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity),
- 315 and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- 316 ASTM C642-97. (2001). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened
- 317 Concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- 318 Bakharev, T., (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated
- 319 temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35, 1224-1232.
- 320 Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., & Rattanasak, U., (2009). Comparative study on
- 321 the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, 29,
- 322 539-543.
- 323 Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., & Taebuanhuad, S., (2013). Resistance to acid and sulfate
- 324 solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Materials and*
- 325 *Structures*, 46, 375-381.
- 326 Davidovits, J., (1991). Geopolymer inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal*, 37, 1633-
- 327 1659.
- 328 Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, & Young Soo Chung., (2013). The mechanical
- 329 properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction*
- 330 *and Building Materials*, 47, 409-418.

- 331 Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P., (2014).  
332 Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium  
333 fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.
- 334 Huajun Zhu, Zuhua Zhang, Fenggan Deng, & Yalong Cao., (2013). The effects of phase  
335 changes on the bonding property of geopolymer to hydrated cement. *Construction*  
336 *and Building Materials*, 48, 124-130.
- 337 Joseph, B., & Mathew, G., (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash  
338 based geopolymer concrete. *Scientia Iranica A* 19, 1188-1194.
- 339 Palomo, A., Grutzeck, MW., & Blanco, MT., (1999). Fracture behaviour of heat cured fly ash  
340 based geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- 341 Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P., (2009). Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly  
342 ash geopolymer. *Miner Eng*, 22, 1073-1078.
- 343 Sarker, K., AHaque, R., & Ramgolam, K., (2013). Fracture behaviour of heat cured fly ash based  
344 geopolymer concrete. *Materials and Design*, 44, 580-586.
- 345 Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K., (2005). Packing effect and  
346 pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Construction and Building Materials*, 35,  
347 1145-1151.
- 348
- 349
- 350
- 351
- 352
- 353
- 354
- 355
- 356
- 357
- 358
- 359
- 360
- 361
- 362
- 363

364

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO <sub>2</sub>	34.10
Aluminum Oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.90
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.91
Calcium Oxide, CaO	18.75
Magnesium Oxide, MgO	-
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O	0.69
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O	2.38
Sulfur Trioxide, SO <sub>3</sub>	2.21
Loss On Ignition, LOI	0.11

365

366 ตารางที่ 2 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก						ความเข้มข้น ของ NaOH (โมลาร์)
	เถ้าถ่านหิน (กรัม)	หินปูน (กรัม)			NaOH (กรัม)	Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>3</sub> (กรัม)	
		เถ้าถ่านหิน : หินปูน					
		1:4	1:6	1:8			
12M-S	1544	6176	0	0	336	668	12
12M-M	1544	0	9264	0	336	668	12
12M-L	1544	0	0	12352	336	668	12
14M-S	1544	6176	0	0	336	668	14
14M-M	1544	0	9264	0	336	668	14
14M-L	1544	0	0	12352	336	668	14
16M-S	1544	6176	0	0	336	668	16
16M-M	1544	0	9264	0	336	668	16
16M-L	1544	0	0	12352	336	668	16
18M-S	1544	6176	0	0	336	668	18
18M-M	1544	0	9264	0	336	668	16
18M-L	1544	0	0	12352	336	668	16

367

368

369

370 ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

ส่วนผสม	บ่มที่อุณหภูมิห้อง				บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ			
	กำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)	กำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน		7 วัน	14 วัน	28 วัน	
12 M-S	114	180	214	187.7	227	342	360	158.6
12M-M	198	250	268	135.4	271	330	353	150.6
12M-L	155	200	299	192.9	244	257	403	165.2
14M-S	126	189	251	192.9	239	352	380	159.0
14M-M	193	217	341	176.7	220	420	367	166.8
14M-L	153	168	308	201.3	264	350	413	166.3
16M-S	110	165	309	280.9	213	257	377	177.0
16M-M	161	200	334	201.3	219	263	430	196.3
16M-L	113	169	301	280.9	191	230	425	222.5
18M-S	102	214	338	331.4	151	223	358	237.1
16M-M	190	242	367	193.2	200	345	369	196.3
18M-L	160	208	338	211.3	220	355	414	188.2

371

372

373

374

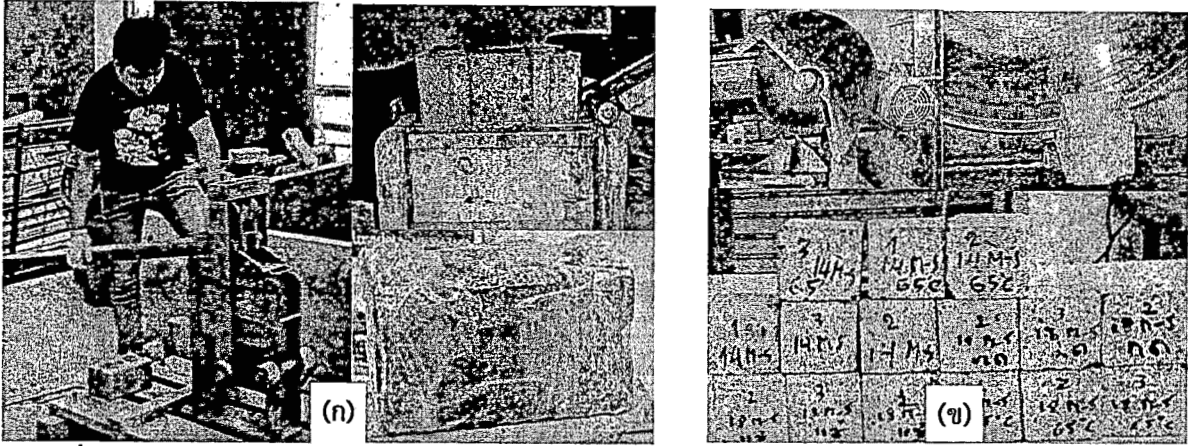
375

376

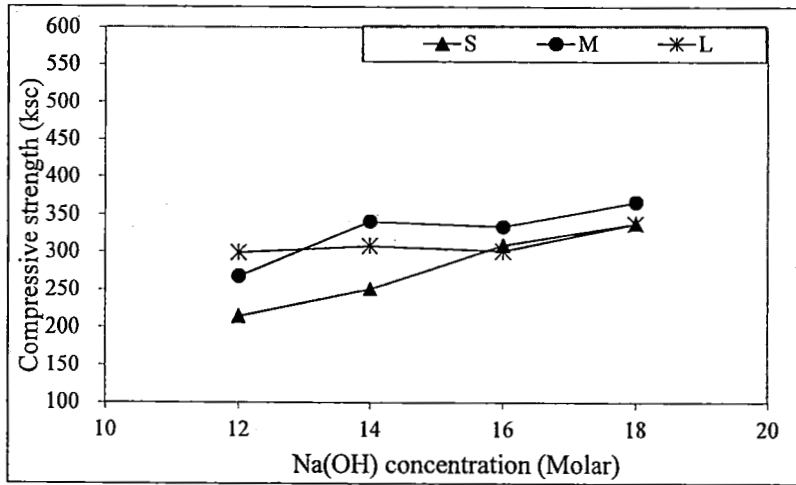
377

378

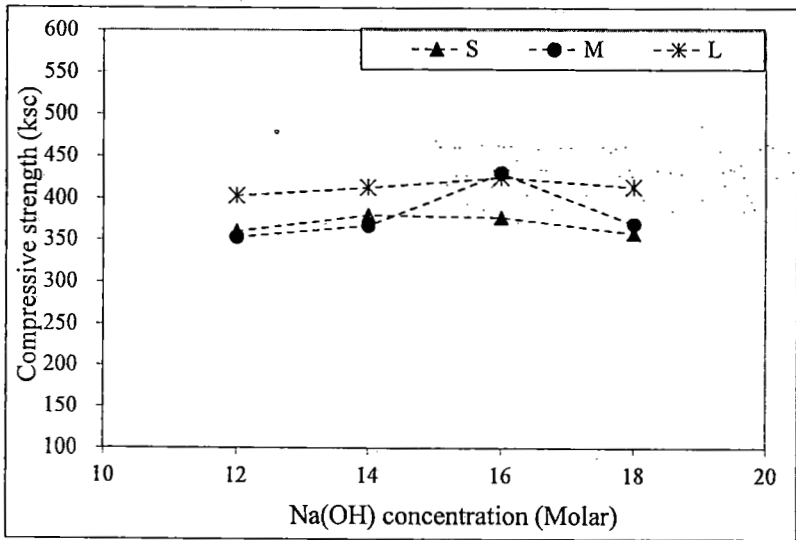
379



380 ภาพที่ 1 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกโดย ก) การอัดคอนกรีตบล็อก ข) การตัดตัวอย่าง  
 381 เพื่อทดสอบกำลังอัด  
 382



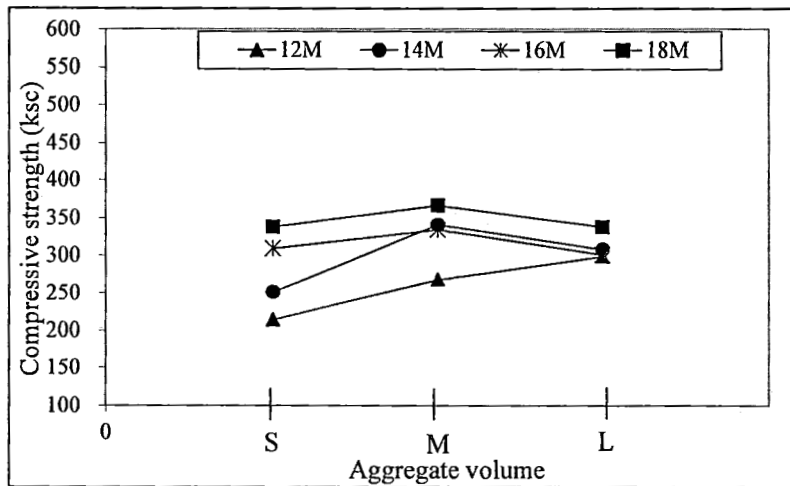
383 ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง  
 384



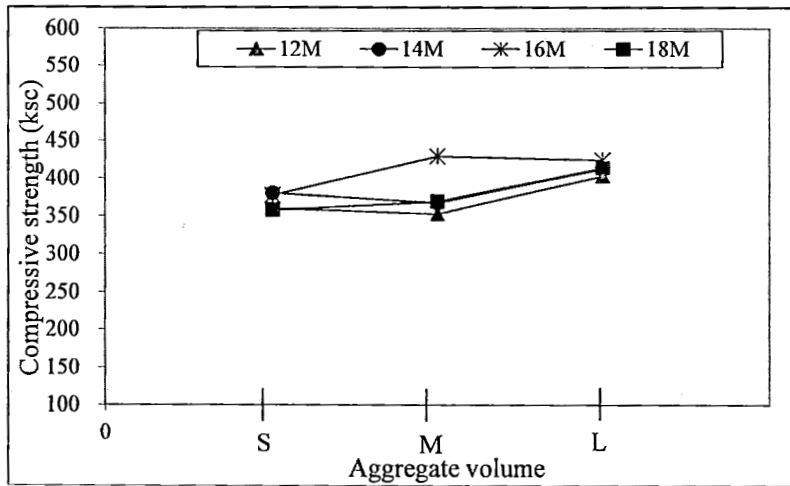
385 ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°C  
 386

387 ภาพที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก  
 388 ที่อายุ 28 วัน





ก) ป่บที่อุณหภูมิห้อง



ข) ป่บที่อุณหภูมิ 65°C

ภาพที่ 3 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน

389  
390

391

392  
393

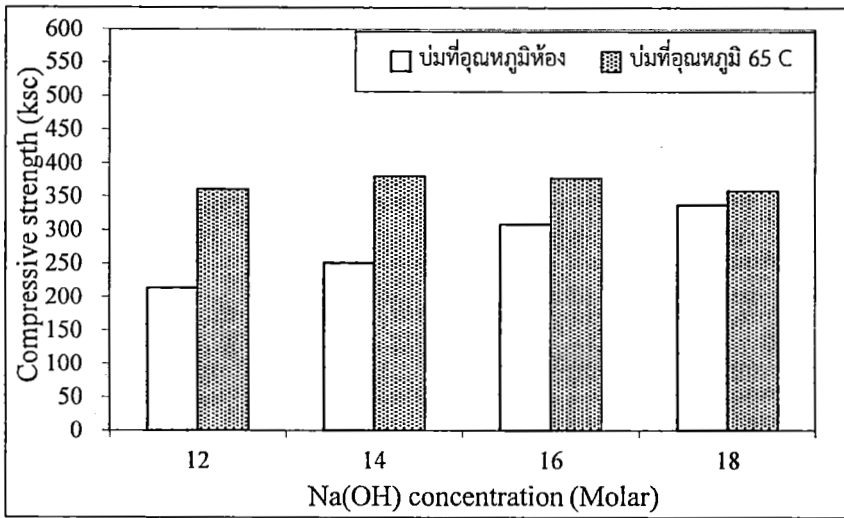
394

395

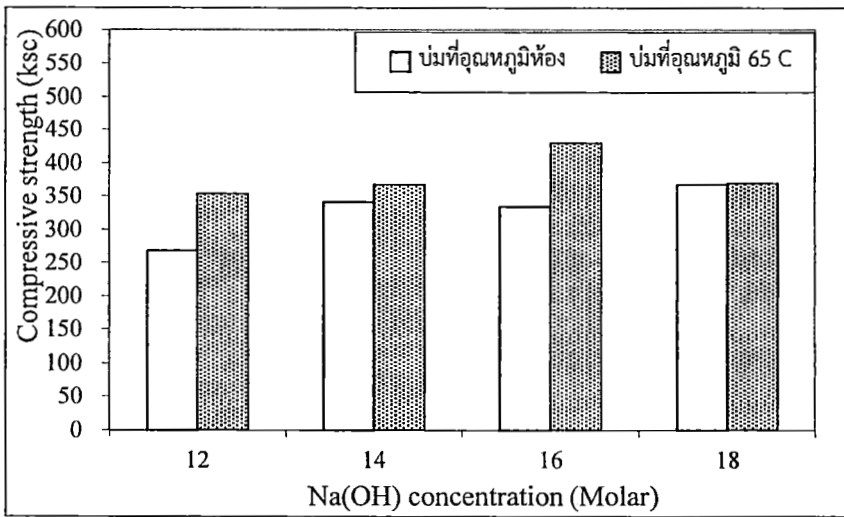
396

397

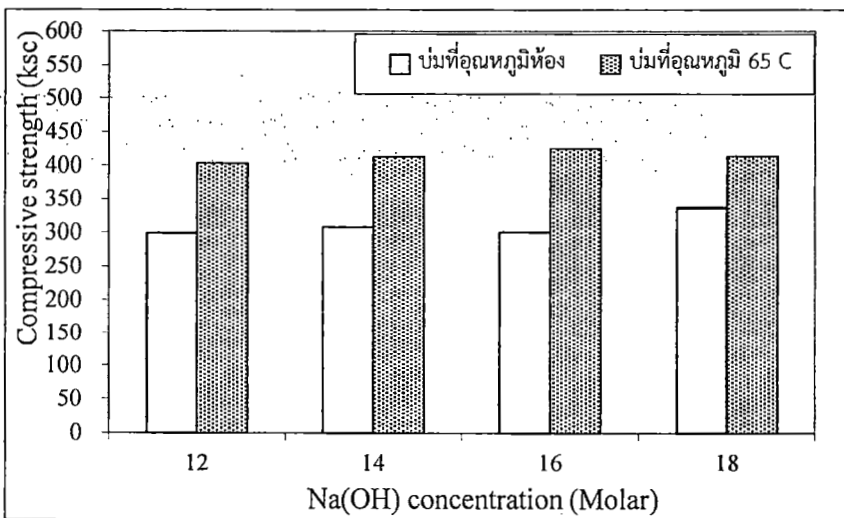
398



ก) ปริมาณมวลรวม S



ข) ปริมาณมวลรวม M



ค) ปริมาณมวลรวม L

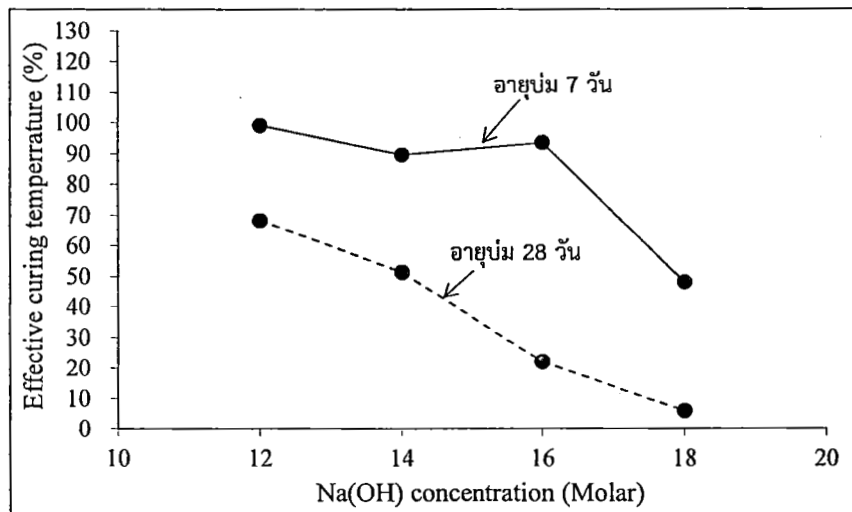
ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน

399  
400

401  
402

403  
404

405  
406

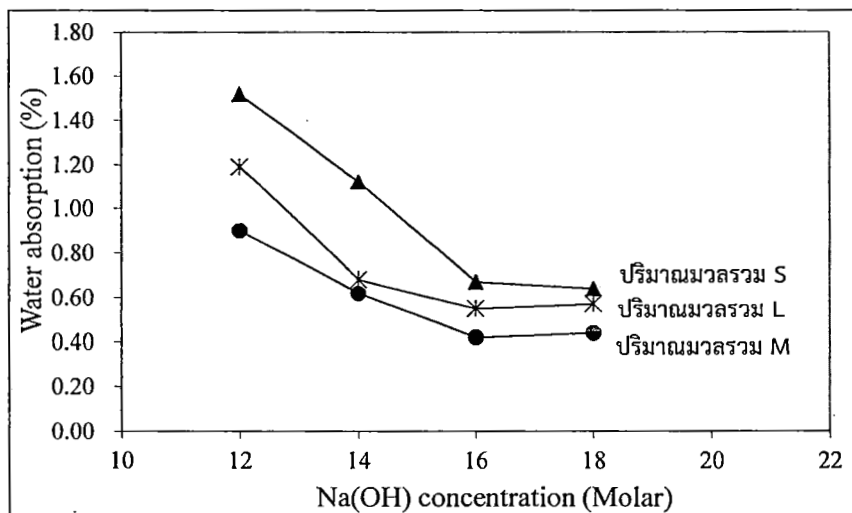


407

409 ภาพที่ 5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิ  
 410 เมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณ S ที่อายุ 7 และ 28 วัน

410

411



412

414 ภาพที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต  
 415 บล็อกที่อายุ 28 วัน

415

416

ภาคผนวก ข  
รายงานการเงิน

รายงานสรุปการเงิน  
เลขที่โครงการ (NRPM 13 หลัก) **2557A10862004**  
โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ  
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ชื่อมหาวิทยาลัย บูรพา

ชื่อโครงการ การผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำถ่านหิน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน / ผู้วิจัย (อ./ศษ./ ผศ./ รศ./ ศ.) วิเชียร ชาติ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/เดือน/ปี) 01/10/2556 ถึงวันที่ (วัน/เดือน/ปี) 30/09/2557

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ (วัน/เดือน/ปี) 01/10/2556 ถึงวันที่ (วัน/เดือน/ปี) 30/09/2557

หมวด	รายจ่าย				
	รายจ่ายสะสม จากรายงาน ครั้งก่อน	ค่าใช้จ่าย งวดปัจจุบัน	รวมรายจ่าย สะสมจนถึง งวดปัจจุบัน	งบประมาณ รวมทั้งโครงการ	คงเหลือ (หรือเกิน)
1. ค่าตอบแทน	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2. ค่าจ้าง	30.000	30.000	60.000	60.000	0.00
3. ค่าวัสดุ	40.000	20.000	60.000	60.000	0.00
4. ค่าใช้สอย	92.000	112.000	204.000	204.000	0.00
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	18.000	18.000	36.000	36.000	0.00
(โปรดระบุเป็นข้อย่อย) (ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค					
รวม	180.000	180.000	360.000	360.000	0.00

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1	180,000	บาท	เมื่อ	ต.ค. 2556
งวดที่ 2	144,000	บาท	เมื่อ	มี.ย. 2557
รวม	324,000	บาท		

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

ภาคผนวก ก  
ประวัตินักวิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย)	นายวิเชียร ชาลี
ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)	Mr. Wichian Chalee
ตำแหน่งปัจจุบัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131  
โทรศัพท์ 038-102-222 ต่อ 3356  
โทรสาร 038-102-222 ต่อ 3355  
E-mail wichian@buu.ac.th

### ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2541

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
พ.ศ. 2546

ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
ธนบุรี พ.ศ. 2550

### สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุก่อสร้าง, คอนกรีตผสมวัสดุปอชโซลานและเถ้าชีวมวล, ความคงทนของคอนกรีต

## ผลงานวิชาการ

### บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับนานาชาติ

- 1) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site”, *Materials and Structures* (Article in Press) (impact factor = 1.184)
- 2) P. Chindaprasirt and W. Chalee, “Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site”, *Construction and Building Materials* 63, 2014, pp. 303–310
- 3) W. Chalee<sup>1</sup>, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment”, *Cement and concrete composites* 37, 2013, pp. 47–53 (impact factor = 2.523)
- 4) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site”, *Construction and Building Materials* 37, 2012, pp. 693–698 (impact factor = 2.293)
- 5) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Pokpong Rattanachu, Wichian Chalee, “Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete”, *Materials and Design* 36, 2012, pp. 597–603 (impact factor = 2.913)
- 6) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Wichian Chalee, Pokpong Rattanachu, “Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate”, *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 2012, pp. 16-22 (impact factor = 0.898)
- 7) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, 2010, “Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment”, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1352–1357 (impact factor = 2.293)
- 8) W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, 2010, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis”, *Materials and Design* (2010) 31 : pp. 1242-1249 (Impact factor = 2.913)



- 9) C. Sanawong and W. Chalee, 2010, "Water permeability in fly ash based geopolymer concrete", J. of Civil engineering and architecture 4 (2010) 15-19
- 10) W. Chalee and C. Jaturapitakkul\*, 2009, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", Materials and Structures (2009) 42 : pp. 505-514 (Impact factor = 1.184)
- 11) W. Chalee, C. Jaturapitakkul\*, and P. Chindaprasirt' 2009 "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater" Marine Structures, 22, 2009, pp.341-353 (Impact factor = 1.333)
- 12) Prinya Chindaprasirt, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, and Ubolluk Rattanasak\*, 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers ," Waste Management, Vol.29, No. 2, pp 539-543. (Impact factor = 1.338)
- 13) Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C.\*, 2007, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment," Construction and Building Materials, Vol.21, No.5, pp. 965-971 (Impact factor = 2.293)

#### บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับชาติ

- 1) มณฑิธร ชีมวาณิช, ประสิทธิ์ อุตสาหกรรม, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549, "ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน" วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2
- 2) วิเชียร ชาลี, มณฑิธร ชีมวาณิช, ประสิทธิ์ อุตสาหกรรม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, "ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด, การซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี" วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166.
- 3) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549, "การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิคไนต์และกำลังอัดของวัสดุซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน," วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.
- 4) ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ, ธวัชชัย สาสกุล, วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, "ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไดซ์เบด", วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 357-370.

- 5) วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552, “การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถั่วก้านเตา”, *Burapha Sci.*, J.14 (1) หน้า 47-55
- 6) ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุตา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2553, “กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถั่วถ่านหิน”, *Burapha Sci.*, J.15 (1) หน้า 13-22
- 7) ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถั่วถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 21 (2) : 187-195
- 8) กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, 2554, “ความถี่ของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล”, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 21 (3) : 257-266
- 9) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 34 (3) : 203-213
- 10) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม* ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2554 หน้า 21-28
- 11) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้ถั่วถ่านหิน”, *Burapha Sci. J.* 16 (2) : 51-62
- 12) ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติและ วิเชียร ชาลี, 2555, “การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 22 (3), 2555: 1-13
- 13) วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555, “การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากถั่วถ่านหิน”, *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 35(2), หน้า 157-170
- 14) ณัฐกร แนบทอง, วิเชียร ชาลี, 2555, “การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต”, *Burapha Sci. J.* 17(2) : 38-49
- 15) วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ, 2556, “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก”, *วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* -36(2), หน้า 197-213
- 16) วิเชียร ชาลี, 2556, “ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา* 18(2), หน้า 132-143

- 17) กิรติกร เจริญพร้อม, วิเชียร ชาลี, 2556 “ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 23 (1),: 107-119
- 18) วิกนกเนตร ชื่นนกลุ่ม วริศรา โกรระวิโยธิน และ วิเชียร ชาลี, 2557 “ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและค่าล้งอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ตอบรับตีพิมพ์)

#### บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับนานาชาติ

- 1) W. Chalee, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul (2011). CORROSION PERFORMANCE OF CONCRETE CONTAINING RICE HUSK-BARK ASH UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE SITE. Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction ISEC-6, Zurich, June 21-26, 21-28.
- 2) Koonthong, S., Chawkitcharoon, P., and Chalee, W. (2010). Compressive strength and thermal conductivity of concrete masonry block containing plastic label waste. The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference, TISD 2010, Thailand, pp.801-804
- 3) Yimsiri, S. and Chalee, W. (2010). Damage of reinforced concrete building due to adjacent deep excavation. 3<sup>rd</sup> ASEAN Civil Engineering Conference, 3ACEC, Manila, Philippine
- 4) Suwanmaneechot, P., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W. (2009). Chloride penetration of concrete containing rice husk-bark ash in marine exposure site. 4th International Conference in Construction Materials: Performance, Innovstions and Structural Implications, Nagoya, Japan, pp. 725-730, 725-730.
- 5) Chalee, W. and Jaturapitakkul, C. (2008). Long Term Performance of Fly Ash Concrete in Marine Environment. The 8th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Bangkok, Thailand, 11th-14th November 2008, pp. 178-182
- 6) T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, P. Chindaprasirt and S. Songpiriyakij (2008). Influence of Si/A1 ratio on Compressive Strength of Rice Husk-Bark Ashes and Fly Ash-based Geopolymer Paste. The 3rd ACF international conference ACF/VCA, Rex Hotel, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 11-13, 2008, pp 151-157

### บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- 1) นำพล บุตรเชื้อไทย เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT113-MAT118.
- 2) วิชย พรหมรักษ์, อภิชาติ ทุมสุด และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์”การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT107-MAT112
- 3) กীরติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ วิเชียร ชาลี, 2556, “ผลของเถ้าปลาล่มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT234-MAT238
- 4) กীরติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี , ๒๕๕๔, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล่มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 7, 19-21 ตุลาคม 2554 อำเภอเมือง จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100.
- 5) วิเชียร ชาลี, ปิยพงษ์ สุวรรณณัฒไชติ,ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ธวัชชัย สาสกุล 2553, “ผลของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล”,การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, 20-22 ตุลาคม 2553 อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี หน้า 40-48.
- 6) ชรินทร์ เสนาวงษ์ อธิธิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี, 2552, “การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเถ้าถ่านหินระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน้า 1587-1592
- 7) ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา ปริญญา จินดาประเสริฐ และ วิเชียร ชาลี, “คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552
- 8) ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ขนาดของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา ”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 1, 22-23 กันยายน 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 39-44

- 9) ศิชน คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ปริมาณของเสียประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทาคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35, 15-17 ตุลาคม 2552, เดอะไทด์รีสอร์ท ชลบุรี
- 10) P. Suwanmaneechot , C. Jaturapitakkul and W. Chalee , 2551, “Water permeability of fly ash concrete in marine environment”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 49-55.
- 11) รัฐพล สมณา วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของเถ้านหิน 3 แห่ง ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 107-112.
- 12) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 66-72.
- 13) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, โรงแรมลองบีช การ์เด้น โฮเทล แอนด์ สปา, พัทยา ชลบุรี หน้า 103-109
- 14) ธวัชชัย สาสกุล , ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและ เอกชัย ภัทรวงษ์ไพบุรุษ, 2550, “กำลังอัดและการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในสภาพแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ. พิษณุโลก หน้า 41-46

#### บทความวิชาการ

- 1) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552, “คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล” โยธาสาร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย), ปีที่ 20, ฉบับที่ 6. หน้า 82-89.
- 2) วิเชียร ชาลี, 2552, “ความคงทนของคอนกรีตในสภาพแข็งตัว” พัฒนาเทคนิคศึกษา, มจพ, ปีที่ 21, ฉบับที่ 69. หน้า 11-17.
- 3) วิเชียร ชาลี, 2554, “อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล” โยธาสาร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย), ปีที่ 23, ฉบับที่ 2. หน้า 1-6.