



การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขาน้อยและตะกอนน้ำประปาเผา

วิทยานิพนธ์  
ของ  
อดิศักดิ์ ชนะพันธ์

พหุณี ปณฺฑิตฺโต สีเว

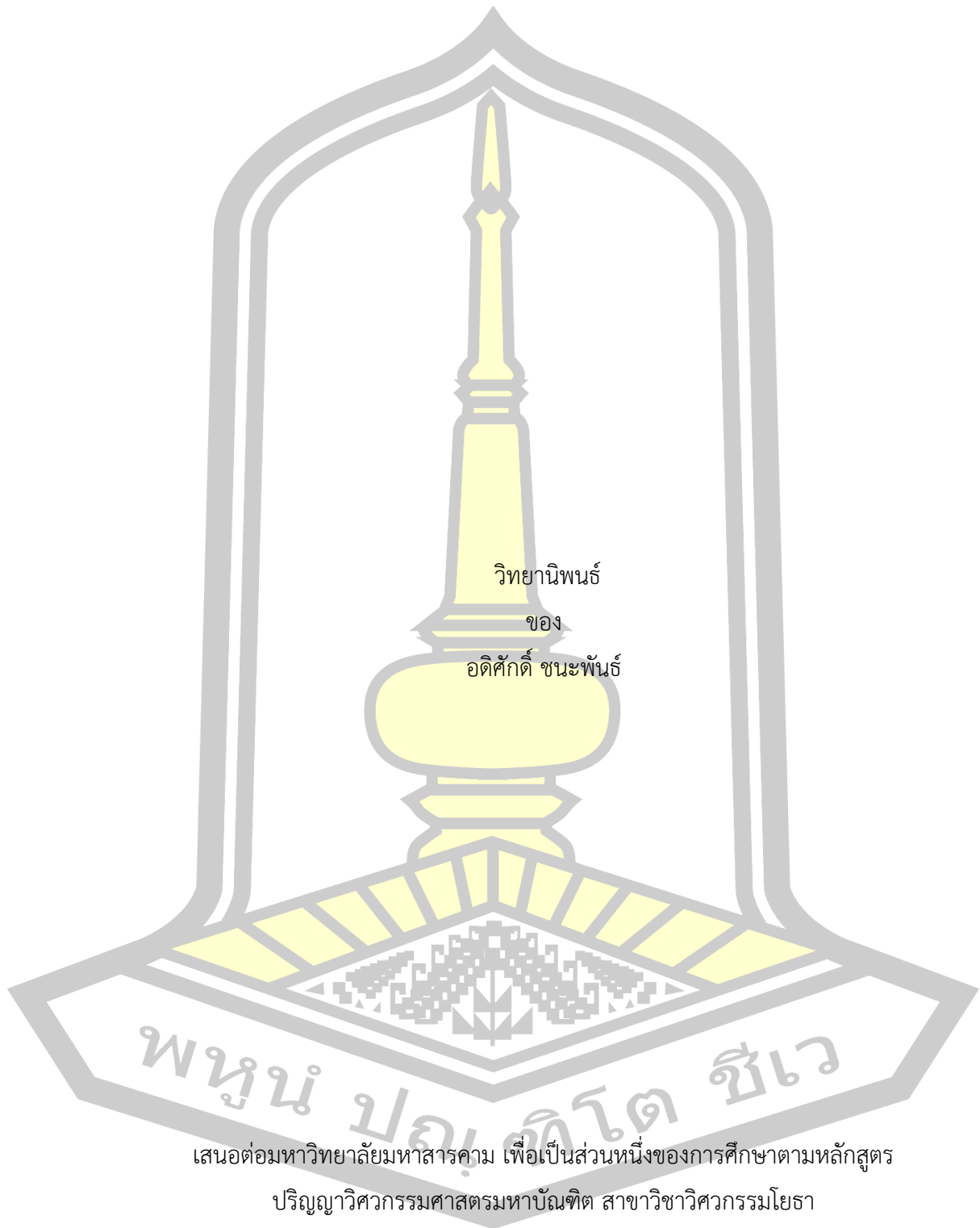
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา

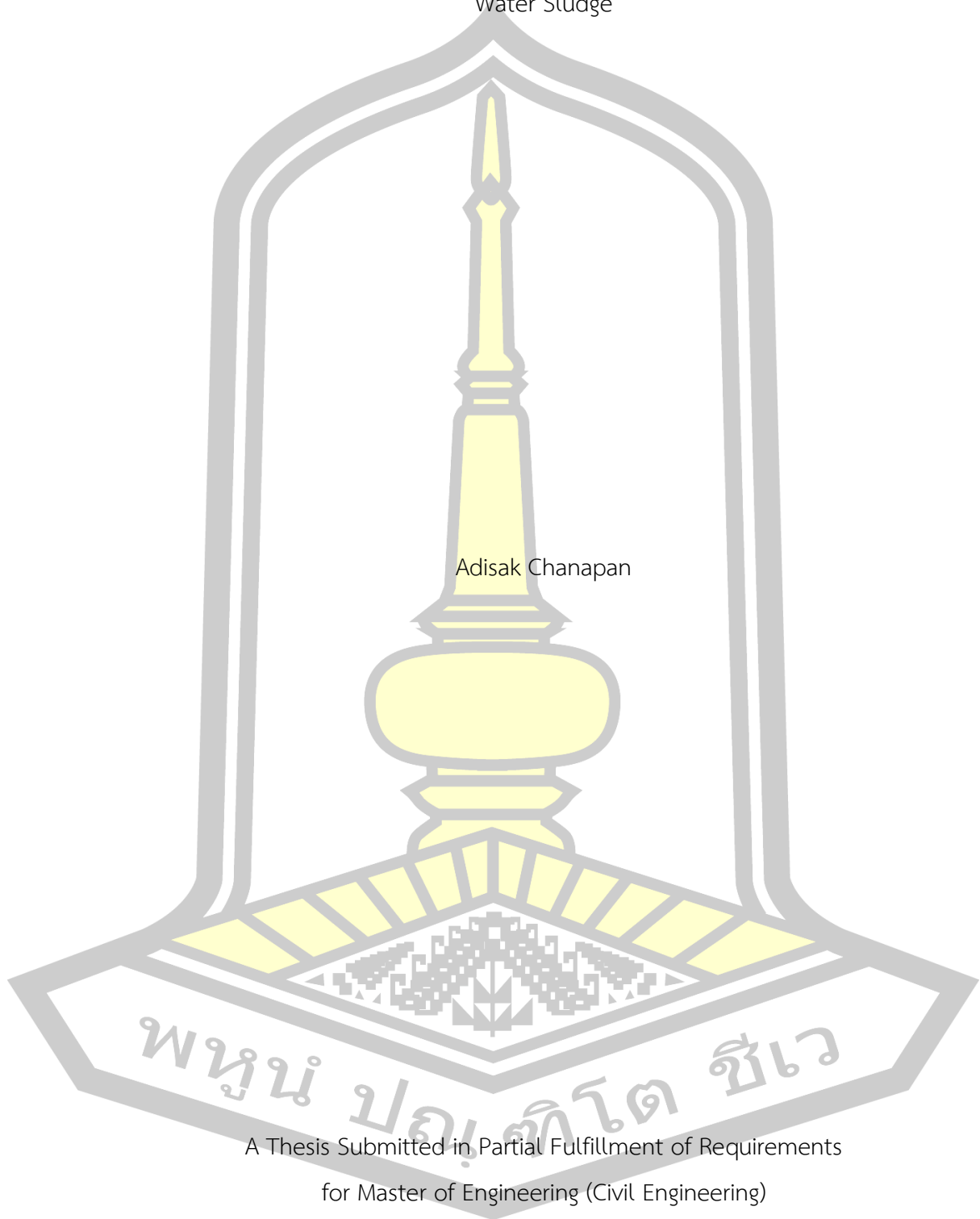


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Geopolymer Concrete Made from Bagasse Ash And Calcined Waste  
Water Sludge



Adisak Chanapan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Civil Engineering)

May 2021

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายอดิศักดิ์ ชนะพันธ์  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ชีรวัดน์ สีนศิริ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม )

.....กรรมการ

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....  
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....  
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปา เผา		
ผู้วิจัย	อดิศักดิ์ ชนะพันธ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากจากวัสดุเหลือทิ้ง โดยการนำเถ้าชานอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาลมาเป็นวัสดุตั้งต้น เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นหลักแต่มีอลูมิน่าค่อนข้างน้อย ตะกอนน้ำประปาเผาจึงถูกนำมาเป็นส่วนผสมเพื่อชดเชยปริมาณของอลูมิน่า เถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผาถูกบดจนมีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) 0.50-0.70 มวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อยและหินบะซอลต์ จากการศึกษาพบว่าผลของการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) ที่สูงขึ้น เพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แต่มีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดที่ลดลง และยังพบอีกว่าชนิดของมวลรวมหยาบมีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : เถ้าชานอ้อย, ตะกอนน้ำประปาเผา, จีโอโพลิเมอร์, ปอชโซลาน, กำลังรับแรงอัด, มวลรวมหยาบ

พูน ปรุ ทิโต ชีเว

**TITLE** Development of Geopolymer Concrete Made from Bagasse Ash  
And Calcined Waste Water Sludge

**AUTHOR** Adisak Chanapan

**ADVISORS** Associate Professor Sahalaph Homwouttiwong , Ph.D.

**DEGREE** Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

**UNIVERSITY** Mahasarakham **YEAR** 2021  
University

### ABSTRACT

This research aims to development of geopolymer concrete from waste materials. Bagasse ash from the sugar industry was used as source material. Since the bagasse ash (BA) contains a lot of silica but small amount of alumina. The calcined water supply sludge waste (WS) was compiled in the mixture to compensate the alumina. Bagasse ash and calcined water supply sludge were ground until their particle size retained on a standard sieve No. 325 less than 5% by weight. Bagasse ash was replaced by calcined water supply sludge in the rage of 5-7.5% by weight. The alkaline to binder materials ratio (AL/B) were between 0.50 -0.70. Two types of 3/8 inch coarse aggregates were used, crushed limestone and basalt. It was found that the effect of replacing bagasse with calcined waste water sludge resulted in a geopolymer concrete with compressive strength higher than 300 ksc. The AL/B ratio increases the workability of geopolymer concrete, but tended to affect the decreasing of compressive strength. Moreover, it was found that the coarse aggregate type had a significant effected on the compressive strength of the geopolymer.

Keyword : Bagasse Ash, Calcined Waste Water Sludge, Geopolymer, Pozzolan, Compressive Strength, Coarse Aggregate

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สทลภ หอมวุฒิวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางการศึกษา ทั้งด้านศึกษาหาข้อมูล การทดสอบ การวิเคราะห์ผล ตลอดจนตรวจสอบเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปด้วยดี นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ กรรมการสอบ ที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาร่วมให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กริสน์ ชัยมูล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แก้ไข ให้แนวคิดต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณทรงฤทธิ์ พุทธิลา และ คุณมีศักดิ์ธนา พัวพิทยธร ผู้คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่มีการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นสถานที่ในการจัดสร้างการทดสอบและจัดทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวขานได้หมดในที่นี่

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัย ที่ได้ส่งเสริม สนับสนุน กระตุ้นเตือน คอยเอาใจใส่ ให้กำลังใจและสนับสนุนทรัพยากรในการจัดทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

อดิศักดิ์ ชนะพันธ์

พูน ปณ ทิโต ชีเว

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer).....	4
2.2 กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization).....	4
2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials).....	6
2.4 สารละลาย (Solution).....	6
2.4.1 สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์.....	6
2.4.2 สารประกอบซิลิเกต.....	6
2.5 แก้วขานอ้อย.....	7
2.6 ตะกอนน้ำประปา.....	8
2.7 มวลรวมหยาบ.....	9



2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์.....	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	19
3.1 แผนการศึกษา.....	19
3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา .....	19
3.1.2 การทดสอบความสามารถในการทำงานได้.....	20
3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับแรงอัด.....	20
3.1.4 การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำ ด้วยชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ..	20
3.1.5 การทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยวิธีได้น้ำ .....	20
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	20
3.2.1 เล้าขานอ้อย .....	20
3.2.2 ตะกอนน้ำประปา.....	20
3.2.3 มวลรวมละเอียด .....	21
3.2.4 มวลรวมหยาบ .....	21
3.2.5 น้ำ .....	21
3.2.6 สารเคมี.....	21
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	21
3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา .....	22
3.5 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	23
3.6 ขั้นตอนการผลิตตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	24
3.7 การทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	25
3.7.1 ทดสอบหาค่ายุบตัว .....	25
3.7.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	25
3.7.3 ทดสอบการหาค่าการซึมผ่านของน้ำ.....	25
3.7.4 การทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยวิธีได้น้ำ .....	26

3.8 แผนการดำเนินการวิจัยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	27
บทที่ 4 ผลการทดสอบ .....	28
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเก้าชานอ้อย ตะกอนน้ำประปาเผา มวลรวม ละเอียด และมวลรวมหยาบ .....	28
4.1.2 ผลการทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบของเก้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา .....	29
4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	29
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าชานอ้อยผสมตะกอน น้ำประปาเผา.....	33
4.3.1 ผลของการแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา.....	34
4.3.2 ผลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) .....	38
4.3.3 ผลกระทบจากมวลรวมหยาบ 2 ชนิดที่มีต่อกำลังรับแรงอัด .....	41
4.4 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	42
4.5 การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	47
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	47
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	53
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	57
ภาคผนวก ค รูปประกอบการทดลอง .....	95
ประวัติผู้เขียน.....	106

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดมหาสารคาม ระหว่างปี พ.ศ. 2554 – 2562 .....	9
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	28
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	29
ตารางที่ 4 การยู่ตัวที่เหมาะสมตามข้อกำหนด วสท.....	30
ตารางที่ 5 การทดสอบหาค่ายู่ตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	31
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา .....	33
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (ต่อ).....	34
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (ผสมหินปูนย่อย) .....	36
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (ผสมหินบะซอลต์) .....	37
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของอัตราส่วนสารอัล คาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) (หินปูนย่อย).....	39
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของอัตราส่วนสารอัล คาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) (หินบะซอลต์).....	40
ตารางที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากมวลรวมหยาบ 2 ชนิด.....	42
ตารางที่ 12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	43
ตารางที่ 13 ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	45

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization).....	5
ภาพที่ 2 ชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต .....	26
ภาพที่ 3 แผนการดำเนินงานวิจัยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	27
ภาพที่ 4 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ผสมหินปูนย่อย).....	32
ภาพที่ 5 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ผสมหินบะซอลต์).....	32
ภาพที่ 6 แสดงการพัฒนาของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย .....	34
ภาพที่ 7 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อมีการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (หินปูนย่อย) .....	36
ภาพที่ 8 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อมีการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (หินบะซอลต์) .....	37
ภาพที่ 9 ผลของอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน (หินปูนย่อย).....	39
ภาพที่ 10 ผลของอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน (หินบะซอลต์).....	40
ภาพที่ 11 ผลกระทบจากมวลรวมหยาบ 2 ชนิดที่มีต่อกำลังรับแรงอัด.....	42
ภาพที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	44
ภาพที่ 13 ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	46

พูน ปณ ทิโต ชีเว

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา อุตสาหกรรมการก่อสร้างได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาประเทศ ส่งผลให้ประเทศไทยต้องผลิตปูนซีเมนต์มาเพื่อรองรับอุตสาหกรรมการก่อสร้างดังกล่าว ในปี พ.ศ.2560 มีการผลิตปูนซีเมนต์ 62.37 ล้านตัน และเพิ่มขึ้นเป็น 66.27 ล้านตัน ในปี พ.ศ.2561[1] และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นทุกปี ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์นั้นทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศโลก พบว่าการผลิตปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1 ตัน จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจำนวนมากส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน[2] การผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็นร้อยละ 5-8 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด [3] ที่ก่อให้เกิดปัญหาสภาวะโลกร้อน จึงมีความพยายามในการลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์หรือพัฒนาวัสดุใหม่ที่มาทดแทนปูนซีเมนต์

ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่นำวัสดุเหลือทิ้งหรือวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมมาใช้ โดยการดึงเอาคุณสมบัติเด่นๆของวัสดุเหลือทิ้งออกมาใช้ แต่วัสดุเหล่านั้นต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) เพื่อง่ายต่อการพัฒนาที่มีการประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากพบว่าวัสดุปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ และทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้นในหลายด้าน[4],[5] วัสดุปอซโซลานได้แก่ เถ้าถ่านหิน(Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาวเผา(Calcined kaolin) เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) และเถ้าชีวมวล (Biomass ash) วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานไม่สามารถยึดประสานได้ด้วยตัวเอง แต่ถ้ามีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เหมาะสม จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ทำให้ก่อตัวและแข็งตัวได้

การพัฒนาการใช้วัสดุใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมเรียกว่าวัสดุนี้ว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของธาตุเป็นองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ประกอบด้วยซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อผสมกับเบสอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวทำรับแรงได้

เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) เป็นเถ้าชีวมวลชนิดหนึ่งที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งหรือวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ใช้ใบอ้อยและชานอ้อย เปรวมกันเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต

กระแสไฟฟ้า แก๊ซซันอ้อยที่เหลือมีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น นำไปเป็นส่วนผสมของปุ๋ยหมักเพื่อใช้ในการเกษตรหรือนำไปปรับสภาพดินที่เป็นกรด ที่เหลือส่วนมากจะนำไปทิ้งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนทิ้ง ค่าใช้จ่ายในการชุดบ่อเพื่อฝังกลบ แก๊ซซันอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้[6],[7] และหาก มีการบดให้มีความละเอียดที่เหมาะสม สามารถปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น มีการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของแก๊ซซันอ้อยพบว่ามี  $\text{SiO}_2$  เป็นส่วนประกอบค่อนข้างสูง[8] แต่มีปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ค่อนข้างต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อที่จะเพิ่มสัดส่วนของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยเลือกใช้ตะกอนน้ำประปาซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำประปา เนื่องจากพบว่ามีส่วนประกอบของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ปนอยู่[9] และเป็นการนำตะกอนน้ำประปามาใช้ให้เกิดประโยชน์และลดปริมาณที่ต้องกำจัดทิ้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยนำแก๊ซซันอ้อยและตะกอนน้ำประปามาเป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดเวลา นำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์และลดปริมาณที่ต้องกำจัด ซึ่งความรู้ที่ได้จะมีประโยชน์ในการผลิตและพัฒนาวัสดุใหม่เพื่อทดแทนหรือลดการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเป็มิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากแก๊ซซันอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา เป็นวัสดุตั้งต้น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่มีผลต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ และการทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

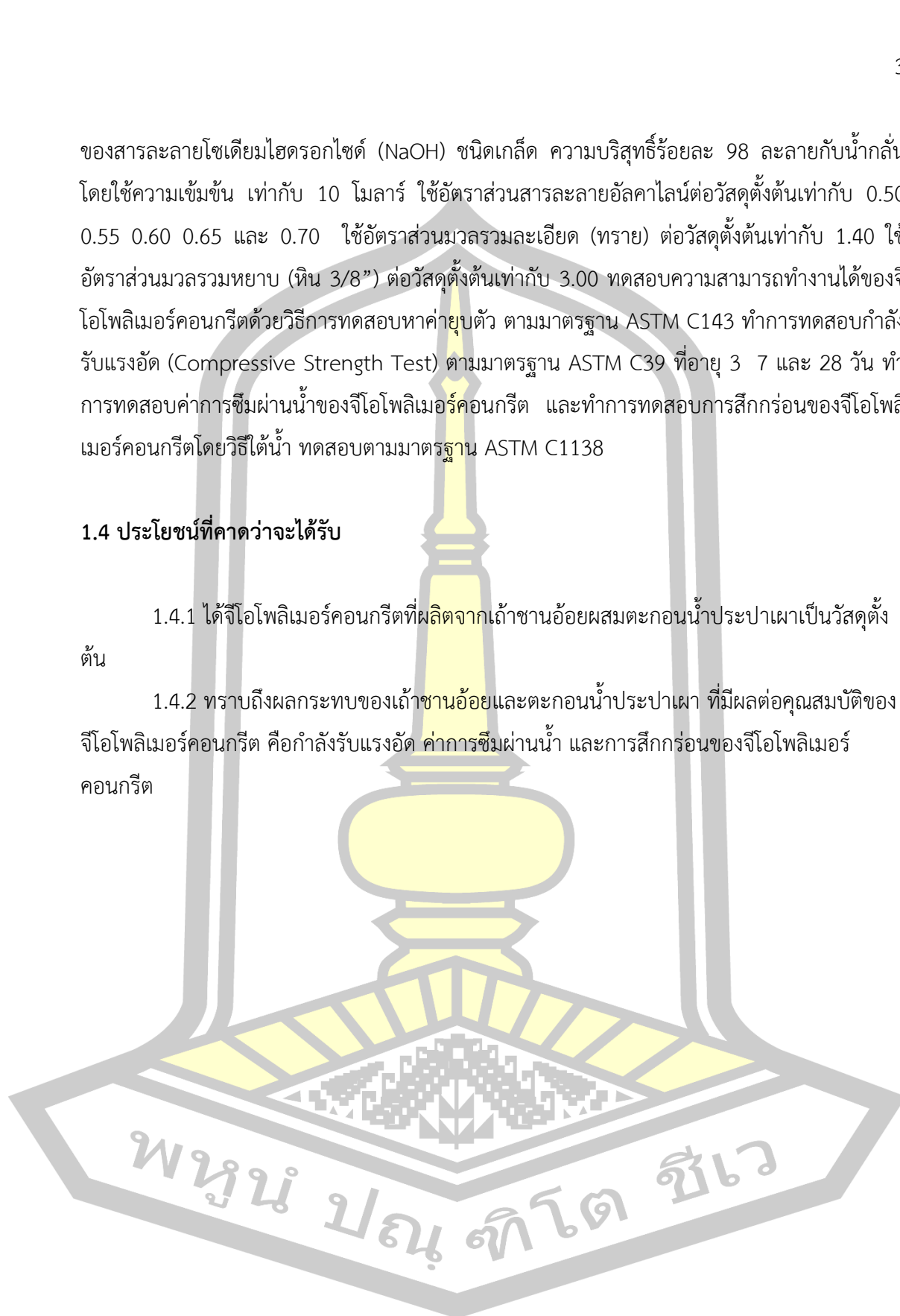
พัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีแก๊ซซันอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา เป็นวัสดุตั้งต้น แก๊ซซันอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาลมิตรภาพสินธุ์ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ ตะกอนน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดมหาสารคาม โดยวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดที่ได้จากแหล่งผลิตโดยตรง ยังคงเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพไม่ดี ต้องนำมาผ่านขบวนการปรับปรุงคุณภาพ ตะกอนน้ำประปาปรับปรุงด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุตั้งต้นทั้งสองชนิดมาบดให้ละเอียดซึ่งต้องมีน้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้ตะกอนน้ำประปาเผาแทนที่แก๊ซซันอ้อยร้อยละ 5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ใช้ความเข้มข้น

ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ละลายกับน้ำกลั่น โดยใช้ความเข้มข้น เท่ากับ 10 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.50 0.55 0.60 0.65 และ 0.70 ใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียด (ทราย) ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 1.40 ใช้ อัตราส่วนมวลรวมหยาบ (หิน 3/8”) ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 3.00 ทดสอบความสามารถทำงานได้ของจี โอลิเมอร์คอนกรีตด้วยวิธีการทดสอบหาค่ายุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C143 ทำการทดสอบกำลัง รับแรงอัด (Compressive Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM C39 ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ทำ การทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของจีโอลิเมอร์คอนกรีต และทำการทดสอบการสึกกร่อนของจีโอลิ เมอร์คอนกรีตโดยวิธีได้น้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1138

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้จีโอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาเป็นวัสดุตั้ง ต้น

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา ที่มีผลต่อคุณสมบัติของ จีโอลิเมอร์คอนกรีต คือกำลังรับแรงอัด ค่าการซึมผ่านน้ำ และการสึกกร่อนของจีโอลิเมอร์ คอนกรีต





## บทที่ 2

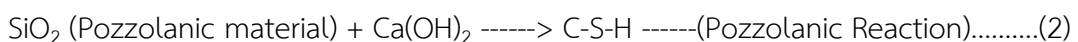
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิด ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ใน รูปร่างอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  หรือ  $\text{KOH}$  แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาวิจัยค้นคว้าเพื่อที่จะหาวัสดุทดแทน ที่จะนำมาใช้แทนซีเมนต์ให้มากที่สุด โดยมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหรือไม่แตกต่างไปจากเดิม และเนื่องจากวัสดุปอซโซลานต่าง ๆ นั้นไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานด้วยตัว มันเองจึงนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้แค่เพียงบางส่วนเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย)

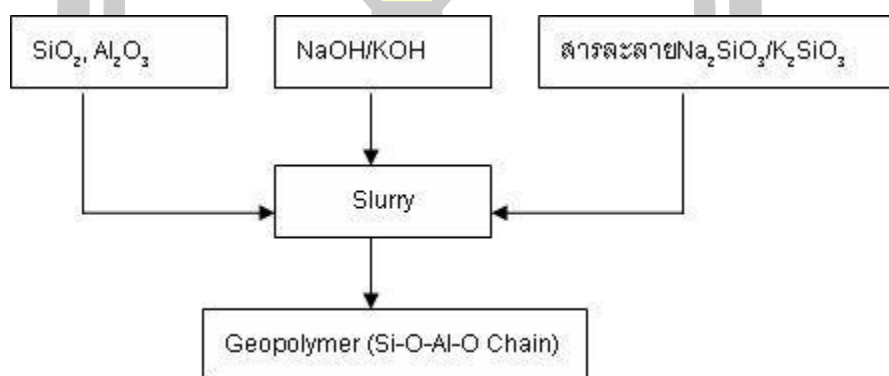
#### 2.2 กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization)

ลักษณะโครงสร้างของ Hydration ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Geopolymer นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสหรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว



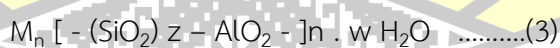


โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$ ) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสมาีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิกา (Si), อะลูมิเนียม (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สาร เหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย



ภาพที่ 1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization)

โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่แตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ของสารตั้งต้น โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์แสดงได้ดังสมการ



เมื่อ M คือ ธาตุอัลคาไลน์

- คือ การยึดเกาะพันธะ

Z คือ จำนวนโมเลกุล

n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สังเกต ได้ว่าวัสดุ Geopolymer จะต้องใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา

Geopolymerization

## 2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials)

ASTM C618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ไว้ว่า วัสดุที่มีออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) หรือออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious Properties) น้อยมาก แต่เมื่ออยู่ในรูปของผงที่ละเอียดและมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่อุณหภูมิปกติได้ และเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) ทำให้ได้สารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหลา

วัสดุปอซโซลานแบ่งเป็น 2 ชนิด คือวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) เช่น เถ้าภูเขาไฟและดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นต้น และวัสดุปอซโซลานที่ไม่ได้เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ (Artificial Pozzolan) เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟุ้ง ตะกรันเตาถลุง เหล็ก เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าขานอ้อย อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญมากสำหรับวัสดุปอซโซลาน คือต้องมีความละเอียดสูงจึงจะทำปฏิกิริยาได้ดีและรวดเร็ว

## 2.4 สารละลาย (Solution)

### 2.4.1 สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์

อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์มีหน้าที่ชะละลาย เปลี่ยนวัสดุที่มีสารประกอบของอลูมินาและซิลิเกตให้เป็นสารสังเคราะห์อัลคาไลน์อะลูมิเนต และซิลิเกต ปลดปล่อยออกเป็นอิสระอยู่ในรูปของสารโมโนเมอร์ อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ได้แก่ สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็นด่างสูงแล้วใช้ได้ดี โดยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมนมากกว่าเนื่องจากราคาไม่สูงนัก หาได้ง่าย และให้อิโพลีเมอร์คุณภาพดี โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้กันมีความเข้มข้นค่อนข้างสูง ประมาณ 5 – 15 โมลาร์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549)

### 2.4.2 สารประกอบซิลิเกต

สารประกอบซิลิเกตที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งมีหลายประเภท ถ้าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$  สูงจะให้กำลังรับแรงดี แต่ความสามารถในการทำงานได้จะต่ำ โดยจะต้องใส่น้ำเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ ตัวอย่างสารโซเดียมซิลิเกตที่มีใน

ห้องตลาดประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{O}$  ร้อยละ 15,  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 33 และน้ำ ร้อยละ 52 (ปริญา จินดา ประเสริฐ, 2549)

## 2.5 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อย (Bagasse ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งใช้ขานอ้อย และใบอ้อย เเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงาน และส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2562 พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตอ้อยทั้งหมดประมาณ 130.970 ล้านตัน และหลังจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วพบว่าได้เถ้าขานอ้อยประมาณ 1 ล้านตัน เถ้าขานอ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ย เพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม แต่ส่วนใหญ่ของเถ้าขานอ้อยต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2562)

เถ้าขานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไปเมื่อบดเถ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับเถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากผ่านการบดทั่วไป สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยพบว่าเถ้าขานอ้อยมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมัน บดละเอียด อยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำ แต่มีปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20-30 การที่ LOI ของเถ้าขานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป (คาวี มนทการติวงศ์ และคณะ, 2548) การแทนที่เถ้าขานอ้อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพลสต์ผสมเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ คอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่มวลรวมละเอียดมีความสามารถในการงานได้ (workability) และการเยิ้มที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยมีความสามารถต้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านน้ำ การต้านการคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอนเนชันเหมือนกันกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าขานอ้อยยังทำให้คอนกรีตต้านทานการแข็งตัวและละลายของน้ำ (freezing and thawing) สลับกัน ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

สำหรับประเทศไทยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าขานอ้อยในงานคอนกรีตไม่มากนัก (อธิภา วงศ์วานกลม:2553) ได้ทำการศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเป็นวัสดุตั้งต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 และ 20 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.50 – 1.50 โดยน้ำหนัก พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าจาก

ถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากถ้าชานอ้อยเพียงชนิดเดียวและกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการบ่มความร้อนในช่วงอายุต้น นอกจากนี้ยังพบว่า การขยายตัวและการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์

การศึกษาถ้าชานอ้อยเพื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ถ้าชานอ้อยมีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ และมีปริมาณมากพอที่อาจสามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับถ้าชานอ้อยยังคงค่อนข้างจำกัด เช่น ในด้านความคงทน รวมถึงคุณสมบัติของถ้าชานอ้อยในแต่ละแหล่งผลิต ซึ่งมีคุณสมบัติของถ้าชานอ้อยที่แตกต่างกัน อาจทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไป จึงจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของถ้าชานอ้อยที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต

## 2.6 ตะกอนน้ำประปา

ตะกอนน้ำประปา คือ ตะกอนดินที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยเป็นอนุภาคดินขนาดเล็กที่ลอยปะปนมากับน้ำดิบแล้วถูกทำให้ตกตะกอนก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการต่อไป ลักษณะตะกอนน้ำประปาจะคล้ายกับดินเหนียว คือมีอนุภาคที่ละเอียดเมื่อผสมกับน้ำจะเหนียว เมื่อแห้งจะแตกร้าวและจับตัวเป็นก้อน

จากข้อมูลโครงการแนวคิดการทำวิจัยการใช้ตะกอนจากการผลิตน้ำประปาให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจ พบว่าในการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร มีน้ำ 1,000 ลิตร มีน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม จะมึน้ำดิบที่ค่าความขุ่น 30 - 40 หน่วยเอ็นทียู จะมีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นประมาณ 25 - 35 มิลลิกรัมต่อลิตร (การประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดมหาสารคาม) จากข้อมูลและสถิติรายงานประจำปี พ.ศ. 2562 พบว่าการประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดมหาสารคามมีกำลังการผลิตน้ำประปาของปี พ.ศ. 2562 ประมาณ 17,457,936 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งคาดว่าจะมีปริมาณตะกอนประมาณ 611 ตัน (การประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดมหาสารคาม)

พูน ปณ ทิโต ชิว

ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดมหาสารคาม ระหว่างปี พ.ศ.  
2554 - 2562

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำประปาที่ผลิต (ลบ.ม.)	ปริมาณตะกอนเฉลี่ย ต่อปีโดยประมาณ (ตัน)	ปริมาณตะกอนเฉลี่ย ต่อวันโดยประมาณ (ตัน)
2554	13,048,740	457	1.252
2555	14,240,328	498	1.364
2556	13,989,988	490	1.342
2557	14,259,852	499	1.367
2558	15,358,620	538	1.474
2559	15,762,096	551	1.510
2560	17,197,392	601	1.647
2561	16,574,844	580	1.589
2562	17,457,936	611	1.674

ที่มา : (การประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดมหาสารคาม 2562)

ในการกำจัดตะกอนน้ำประปาโดยวิธีการนำไปถมที่ ภายในบริเวณพื้นที่การประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดมหาสารคาม ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปตะกอนน้ำประปามีปริมาณสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงมีการนำตะกอนไปทิ้งภายนอกพื้นที่โดยในปัจจุบันการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดมหาสารคามได้จ้างบริษัทเอกชนเพื่อทำการกำจัดตะกอนน้ำประปา ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการกำจัด

## 2.7 มวลรวมหยาบ

### 2.7.1 แหล่งหินที่สำคัญของไทย

ประเทศไทยมีทรัพยากรหินบะซอลต์เพื่อการก่อสร้างกระจายอยู่ทั่วเกือบทุกจังหวัด โดยส่วนใหญ่เป็นหินปูน นอกจากนั้นเป็นหินชนิดอื่นๆ เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินแกรนิต หินแกรนิต หินแอนดีไซต์ และหินไรโอไลต์ โดยแหล่งหินชนิดต่างๆ ของประเทศไทย มีดังนี้

แหล่งหินปูนขนาดใหญ่ในอำเภอหน้าพระลาน อำเภอพระพุทธบาท และอำเภอ เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี เป็นแหล่งหินปูนเพื่อการก่อสร้างและอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ แหล่งหินปูนที่สำคัญในพื้นที่จังหวัดอื่นๆ เช่น แหล่งหินปูนในอำเภออุทอง จังหวัดสุพรรณบุรี แหล่งหินปูนในอำเภอเมือง ราชบุรี จังหวัดราชบุรี แหล่งหินปูนในอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา แหล่งหินปูนในอำเภอภูพาน และอำเภอชุมแพ จังหวัดอุบลราชธานี แหล่งหินปูนในอำเภอเมืองเลย อำเภอวังสะ

พุง อำเภอผาขาว อำเภอหนองหิน และอำเภอเอราวัณ จังหวัดเลย แหล่งหินปูนในอำเภอตากลี และ อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์ แหล่งหินปูนในอำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร แหล่ง หินปูนในอำเภอเนินมะปรางค์ จังหวัดพิษณุโลก แหล่งหินปูนในอำเภอศรีสาโรง จังหวัดสุโขทัย แหล่ง หินปูน ในอำเภอวังเหนือ อำเภองาว และอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง แหล่งหินปูนในอำเภอบ้านตา ขุน จังหวัดสุราษฎร์ธานี แหล่งหินปูนใน อำเภอเมืองพังงา จังหวัดพังงา และแหล่งหินปูนในอำเภอ บ้านโฮ้ง จังหวัดลำพูน

แหล่งหินแกรนิต และหินไนส์ ในจังหวัดชลบุรี จังหวัดระยอง จังหวัดจันทบุรี จังหวัดตาก จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเลย และจังหวัดประจวบคีรีขันธ์

แหล่งหินบะซอลต์ ในอำเภอเมืองบุรีรัมย์ อำเภอบ้านกรวด อำเภอเฉลิมพระเกียรติ และ อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ อำเภอไผ่แก่น และอำเภอทุ่งศรีอุดม จังหวัดอุบลราชธานี อำเภอ เมืองสุรินทร์ และอำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ อำเภอกันทรลักษ์ และอำเภอขุนหาญ จังหวัดศรีสะเก ขะ นอกจากนี้ยังพบหินบะซอลต์ในจังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดจันทบุรี จังหวัดตราด จังหวัดลำปาง จังหวัดลพบุรีจังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดแพร่

แหล่งหินทรายในพื้นที่จังหวัดต่างๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น จังหวัดอุบลราชธานี จังหวัดศรีสะเกษ จังหวัดหนองบัวลำภู และจังหวัดนครพนม เป็นต้น

แหล่งหินแอนดีไซต์และหินไรโอไลต์ ในอำเภอแก่งคอย อำเภอวิหารแดง และอำเภอ มวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี อำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ และอำเภอชนแดน จังหวัดเพชรบูรณ์

แหล่งหินแกรนิต (หินทรายชนิดหนึ่ง สีเข้ม เนื้อหยาบ การคัดขนาดไม่ดี) ในอำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี

## 2.7.2 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหิน

สำหรับคุณสมบัติทางกลศาสตร์หรือคุณสมบัติของหินก่อสร้างชนิดต่างๆ ในประเทศไทย และ คุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่เหมาะสมกับงานทางของหินปูน หินบะซอลต์ หินแกรนิต หินทราย และหิน แอนดีไซต์ ซึ่งประกอบด้วยค่าการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion Value : LAA) ค่าปริมาณการ แดกหักเมื่อถูกแรงตกกระแทก (Aggregate Impact Value : AIV) ค่าปริมาณการแตกหักเมื่อถูกแรง บด (Aggregate Crushing Value : ACV) ค่าปริมาณของส่วนที่ไม่คงทน (Soundness) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Value) และค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 สำหรับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินสำหรับงานทางและงานคอนกรีต ตาม มาตรฐานสากลประกอบด้วยค่าการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion Value : LAA) ค่าปริมาณการ แดกหักเมื่อถูกแรงตกกระแทก (Aggregate Impact Value : AIV) ค่าปริมาณการแตกหักเมื่อถูกแรง บด (Aggregate Crushing Value : ACV) ค่าปริมาณของส่วนที่ไม่คงทน (Soundness) และค่า



ส่วนประกอบของแร่ทุติยภูมิ (Secondary mineral content) สำหรับหินก่อสร้างที่ใช้เป็นวัสดุผิวทาง วัสดุพื้นทาง และวัสดุรองพื้นทางได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

1. คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินในประเทศไทย (หน่วย : ร้อยละ)

ชนิดหิน	การสึกหกร (LAA)	การแตกหัก จาก แรงตก กระแทก (AIV)	การแตกหัก จากแรงบด (ACV)	การต้าน การลื่นไถล (PSV)	ความ ถ่วงจำเพาะ (SG)	การดูดซึมน้ำ (Absorption)
หินปูน	22 - 33	9.7 - 14.8	17.5 - 26	36 - 44	2.68 - 2.76	0.15 - 0.55
หินบะซอลต์	15 - 20	12.1 - 14.8	11.4 - 14.6	49.1 - 51.8	2.63 - 2.92	0.50 - 1.90
หินแกรนิต	21 - 29	13.5 - 18.2	19.2 - 23.8	48 - 52	2.60 - 2.75	0.30 - 1.06
หินทราย	31 - 75	15.3 - 40.2	19.2 - 37.5	53 - 65	2.24 - 2.64	1.21 - 3.80
หินแอนดีไซต์	22	11.0 - 13.0	12.0 - 15.0	49.4 - 51.3	2.64 - 2.66	0.30 - 1.06

(สุรพล สงวนแก้ว และคณะ, 2547)

2. คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินที่เหมาะสมกับงานทาง (หน่วย : ร้อยละ)

ชนิดหิน	การสึกหกร (LAA)	การแตกหัก จาก แรงตก กระแทก (AIV)	การแตกหัก จากแรงบด (ACV)	การต้าน การลื่นไถล (PSV)	ความ ถ่วงจำเพาะ (SG)	การดูดซึมน้ำ (Absorption)
หินปูน	25 - 30	7 - 20	16.3 - 27.4	36 - 45	2.68 - 2.77	0.15 - 0.53
หินบะซอลต์	15 - 25	10 - 13	16 - 17	47 - 51	2.64 - 2.92	0.45 - 1.60
หินแกรนิต	20 - 30	9.5 - 21	16.5 - 25	50 - 55	2.54 - 3.00	0.50 - 0.80
หินทราย	-	19	17	69	2.69	0.60
หินแอนดีไซต์	20 - 25	11 - 16	15 - 17	49-51	-	-

(สุรพล สงวนแก้ว และคณะ, 2547)

### 3. ค่ามาตรฐานของคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินงานทางและงานคอนกรีต

วิธีการทดสอบ	วัสดุผิวทาง	วัสดุพื้นทาง	วัสดุรองพื้นทาง	งานคอนกรีต
การสึกหรอ (Los Angeles Abrasion test)	<35 %	30 – 40 %	35 – 50 %	25 – 30 %
การแตกหักจากแรงตกกระแทก (Aggregate Impact Value)	<30 %	<40 %	-	-
การแตกหักจากแรงบด (Aggregate Crushing Value)	<30 %	<30 %	<35 %	<30 %
ส่วนที่ไม่คงทน (Sulphate Soundness Value)	<12 %	<12 %	<12 %	<12 %
ส่วนประกอบของแร่ทุติย ภูมิ(Secondary mineral content)	<25 %	<25 %	<30 %	-

(สุรพล สงวนแก้ว และคณะ, 2547)

#### 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์

อธิกา วงศ์วานกลม (2553 :บทคัดย่อ) ได้ทำการศึกษาการทำจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเป็นวัสดุตั้งต้น โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 และ 20 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.50-1.50 โดยน้ำหนัก พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยเพียงชนิดเดียว และกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการบ่ม ความร้อนในช่วงอายุต้น นอกจากนี้ยังพบว่า การขยายตัวและการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์

จิรัฐิติ บรรจงศิริ (2556) การศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันโดยเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน อัตราส่วนผสมร้อยละของเถ้าต่อร้อยละของของเหลว 2 แบบ คือ 1 : 1 ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และ 1 : 1 ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ทำการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้อัตราส่วน 1 : 1 ผลการศึกษาพบว่าการทดสอบทางเคมีพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปูโซลลาน Class N ตามมาตรฐานของ ASTM C618



กำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์ที่ดีที่สุด คือ เถ้า : ของเหลว เท่ากับ 1 : 1 ความเข้มข้น 10 โมลลาร์ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสที่ 28 วัน กำลังรับแรงอัดระหว่างมอร์ต้ามาตรฐานกับจีโอโพลิเมอร์ ปรากฏว่ามอร์ต้ามาตรฐานสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์ โดยภาพรวมการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์ช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน ไปแล้วกำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาไม่มากนัก

วรยศ วิชูธีรศานต์ (2556) ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อกำลังอัดของสารประกอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ จากเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าตะกอนน้ำประปา โดยสารตั้งต้นทั้งสองชนิดถูกนำมาอบแห้ง แล้วบดละเอียดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตะกอนน้ำประปาที่เผาด้วยอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง การแทนที่ในเถ้าขานอ้อยไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สูงกว่าการแทนที่ร้อยละอื่นๆ และยังพบอีกว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผามีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1.00 และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลลาร์ และอุณหภูมิของการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส แต่การใช้ตะกอนน้ำประปาส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง และมอร์ต้าร์มีการหดตัวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าขานอ้อยเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว

G.C. Cordeiro, L.M. Tavares, R.D. Toledo Filho (2016) Selective grinding was identified as a potential technology to reduce the content of quartz in sugar cane bagasse ash (SCBA), so as to assist in developing an improved supplementary cementitious material. The selective grinding strategy comprised of a ball mill and two classifiers, where a quartz-rich waste is discharged as a coarse waste by the first one. The amenability of two distinct SCBA samples to selective grinding was first demonstrated on the basis of measurements of strength of individual particles. The samples were then analyzed with respect to chemical and mineralogical compositions and pozzolanic activity. Results showed that the quartz content decreased significantly as a result of selective grinding and classification, thus increasing the amorphous content and, consequently, the pozzolanic activity for both of the studied SCBA samples. Moreover, good correlations were observed between the amorphous content and SCBA reactivity considering electrical conductivity and pozzolanic activity index tests.

Marcela M.N.S. de Soares , Dayana C.S. Garcia, Roberto B. Figueiredo c, Maria Teresa P. Aguilar, Paulo R. Cetlin (2016) The present paper aims to clarify the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash-SCBA by comparing it to amorphous and crystalline silica. It is shown that calcium silicate hydrate is formed in lime solution with SCBA but the reaction is slow and does not consume all the material. Comparing its results with the obtained in tests with silica fume and with crushed quartz show a better agreement with the latter. Characterization of cement pastes shows 20% of cement replacement by sugar cane bagasse ash leads to only a minor reduction in the amount of calcium hydroxide formed. This behavior is also closer to the observed in quartz than in silica fume. The results suggest SCBA should be used as a replacement for inert constituents in cement composites rather than pozzolanic addition. Analysis of the microstructure of the cement pastes revealed the presence of calcium hydroxide in samples prepared with partial replacement by silica fume, quartz and sugar cane bagasse ash. The presence of this phase in the sample prepared with silica fume was attributed to agglomeration of the particles that affected the reactivity of this material.

Moisés Frías, Olga Rodríguez, Ma Isabel Sanchez de Rojas, Ernesto Villar-Cociña, Michelle S. Rodrigues, Holmer Savastano Junior (2017) Due to economical and sustainable issues there is growing interest in investigating agro-industrial wastes as alternative route for future eco-efficient and sustainable pozzolans. The generation of ashes from cogeneration processes in which sugar cane wastes are used as biomass, involves significant environmental, social and health problems when they are accumulated in dumps. This paper explores the scientific and technical aspects of two Brazilian sugar cane ashes from different processes of production: one from an industrial cogeneration process and another from laboratory scale, maintaining the same proportions of mixture (50% mixture of bagasse and leaf). Subsequently, their behavior in ordinary Portland cement matrices made with 20% ashes substitution was analyzed. The results show that the industrial ashes presented variations on the chemical and mineralogical compositions, pozzolanic reaction rate and different formation of hydrated phases with respect to the laboratory ashes. The 20% blended cements complied with the chemical, physical and mechanical

requirements set out in the existing Standards, maintaining the mechanical performance with respect to the control mortar at 60 days of curing.

Venustiano Ríos-Parada, Víctor Guillermo Jiménez-Quero , Pedro Leobardo Valdez-Tamez ,Pedro Montes-García ,(2017) The effects of the addition of a Mexican sugarcane bagasse ash to binary concrete prepared with blended Portland cement (CPC) and fly ash (FA) were studied. The sugarcane bagasse ash was used practically as received (UtSCBA), with the only post-treatment application sieving through a No. 75 mm (ASTM) mesh for four minutes. The characterization of the materials used for the concrete preparation was carried out using RXFE, XRD and SEM/EDS, and the BET methods. Besides the control mixture, three ternary concrete mixtures were prepared: the control mixture (C) with 100% CPC; a mixture with 80% CPC, 20% FA and 0% UtSCBA (T0); a mixture with 70% CPC, 20% FA and 10% UtSCBA (T1); and a mixture with 60% CPC, 20% FA and 20% UtSCBA (T2). The properties of the concretes in fresh and hardened states were studied. In the fresh state, slump, volumetric weight, air content and temperature were estimated, while in the hardened state microstructure, mineral phases, compressive strength, moduli of elasticity and Poisson ratios were investigated. The results indicate that UtSCBA can be considered as a pozzolan even though the LOI content is higher than the maximum allowed in the Standard. UtSCBA particles are heterogeneous (in shape and size) with a specific surface area similar to that of the CPC. Because it has a larger volume of total pores, the use of UtSCBA leads to a reduction of workability and volumetric weight; however, the air content and the temperature in the fresh state are not affected. The results of XRD and SEM/EDS suggest that at early ages both a physical effect of dilution of the CPC and the high carbon content in the SCBA negatively affect the compressive strength of the concretes. However, the pozzolanic reaction of the SCBA is beneficial at later ages. The combination of 10% UtSCBA plus 20% FA did not affect either the development of the strength of the concrete or its modulus of elasticity. On the other hand, the addition of 20% UtSCBA decreased the strength of the concrete at early ages, but after 90 days it was similar to the strength of the control mixture.

Guilherme C. Cordeiro , Kimberly E. Kurtis (2017) This work intends to contribute to the understanding about the effect of sugar cane bagasse ash (SCBA) on the hydration of cement-based pastes by focusing on the influence of different particle size (or specific surface area). Isothermal calorimetry, thermogravimetry, chemical shrinkage, and strength pozzolanic index tests were performed to compare the hydration and chemical evolution of pastes containing SCBA with different fineness and pastes with inert (quartz) and pozzolanic (rice husk ash) materials. The results showed that a clear change in the kinetics of hydration and portlandite content by comparing the SCBA with different particle sizes. In addition, the different SCBAs had a marked effect on the chemical shrinkage and portlandite, with an intermediate behavior between the pastes with quartz and rice husk ash. Finally, with increasing in specific surface area and soluble fraction of SCBA, its pozzolanic activity was progressively enhanced due to both portlandite consumption and physical effects.

Hervé Kouamo Tchakouté, Claus Henning Rüscherb, Malte Hinschb, Jean Noël Yankwa Djocob, Elie Kamseu , Cristina Leonelli (2017) Sugar cane bagasse ash from SOSUCAM company in Cameroon was used to synthesize sodium water glass as a new alternative hardener. The new hardener was used to prepare metakaolin-based geopolymer cements. The compressive strength of the resulting geopolymer cement cured at room temperature for 28 days was 32.9 MPa. Samples soaked for 28 days in water in parallel experiments revealed a strength of 31.4 MPa. This shows that exposure of water does not lead to any weakening. The value of water absorption was 7.1% in the water-soaked cements, indicating the presence of fewer pores and voids than in the dry cements. However, in SEM micrographs, the microstructure of geopolymer cement appears rather homogeneous and compact without any change by water soaking. It can thus be concluded that sodium water glass from sugar cane bagasse ash can be used as an alternative hardener or reactive ingredient for producing geopolymer cement with a high degree of cross-linking geopolymer framework. The use of this low-value silica-rich waste for producing sodium water glass results in environmental benefits including a significant reduction of CO<sub>2</sub> emission and energy consumption compared to the production of commercial sodium water glass.

Guilherme Chagas Cordeiro , Priscila Vinco Andre~ao , Luís Marcelo Tavares (2019) This paper evaluated the feasibility of using residual sugar cane bagasse ash with a high carbon content (asreceived SCBA) as raw material to produce a pozzolan after controlled recalcination and grinding. Initially, the asreceived SCBA was re-burned using rotary (continuous) and muffle (batch) kilns, both at 600 C for 1 h. Next, the resulting ash was ground in a closed-circuit ball mill with an air classifier system to obtain a product with 50% passing particle size of approximately 10  $\mu\text{m}$  (SCBA600). SCBA600 was then characterized in terms of oxide composition, loss on ignition, density, specific surface area, and pozzolanic activity. A hydration study was carried out using isothermal calorimetry, thermogravimetric analysis and mercury intrusion porosimetry. Additionally, the performance of SCBA600 in mortars was evaluated by axial compression tests. The combination of recalcination at 600 C, low-energy ultrafine grinding of the material and classification resulted in pozzolanic SCBA. The results also showed that including SCBA600 in cement mortars reduced total accumulated heat and portlandite content in cement-based pastes, in addition to refining pore structure and significantly increasing compressive strength after 3 days of curing.

Kennedy Onyelowe , Duc Bui Van , Clifford Igboayaka , Francis Orji , Henry Ugwuanyi (2019) This work highlights on the available techniques and procedures of soil stabilization and to keep geotechnical engineers in the developing world abreast of the cheaper technologies with respect to soil stabilization. This work also emphasized on the need to make use of the emerging technologies of geomaterials and ecofriendly approaches to achieving a bio-based soil stabilization in this field. We are caught in crossfire when our structures fail due to the fact that soils are not studied to determine what needs to be done to improve in the microstructural, mechanical, hydrogeological, geophysical and strengthening properties of soils before erecting structures. There are lots of soil stabilization techniques and procedures available as outlined by the present work. Apart from the most commonly used techniques; mechanical (compaction, dewatering, mixing and so on) and chemical (lime, cement, bitumen, fly-ash and so on), there are other cheaper methods of stabilizing and improving the geophysical properties of soil like the use of

geomaterial additives like bagasse ash (sugar cane foil ash), egg-shell ash, quarry dust, palm bunch ash, palm kernel ash, paper ash, crushed waste ceramics, crushed waste glasses, crushed waste plastics, snail shell ash, oyster shell powder, and so on. The ashes are amorphous materials from the direct combustion of solid waste materials while the powders are crushed solid waste too. It has been found that these biobased materials are also of highly pozzolanic properties which has made this a novel technology because of the green nature of the exercise. The CO<sub>2</sub> emission with utilization of these organic and solid waste based geomaterials is zero, hence a total replacement of ordinary Portland cement in soil treatment with these alternative cementing additives is a breakthrough to our environment.

S. Praveenkumar, G. Sankarasubramanian, S. Sindhu (2019) Bagasse ash, byproduct of sugar production is considered to be an active pozzolan. However, the effective use of bagasse ash in mortar and concrete needs the controlled process of grinding to achieve the required fineness and uniformity to meet the standards of industry. This article investigates the method used for production of bagasse ash with high specific surface area and pozzolanic activity using the laboratory ball milling and pulverizer under controlled burning condition. The various properties of cement paste and mortar blended with processed bagasse ash were analyzed. The chemical and morphological characteristics were observed using various techniques like X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Fluorescence (XRF), Electron Dispersive Spectroscopy (EDS) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results show that the behavior of cement pastes and mortars changed significantly up to 10% replacement level of treated bagasse ash.

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ผู้ทำการศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อย ร่วมกับตะกอนน้ำประปาเผามาเป็นวัสดุตั้งต้น ทำการปรับปรุงคุณภาพตะกอนน้ำประปาด้วยกรรมวิธีการเผาคล้ายกับการปรับปรุงคุณภาพของดินขาว โดยหาอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ให้ดีขึ้น



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการศึกษา

ศึกษาการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา เป็นวัสดุตั้งต้น เถ้าขานอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาลมิตรภาพสินธุ์ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ ตะกอนน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดมหาสารคาม โดยวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดที่ได้จากแหล่งผลิตโดยตรงยังคงเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพไม่ดี ต้องนำมาผ่านขบวนการปรับปรุงคุณภาพ ตะกอนน้ำประปาปรับปรุงด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุตั้งต้นทั้งสองชนิดมาบดให้ละเอียดซึ่งต้องมีน้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้ตะกอนน้ำประปาเผาแทนที่เถ้าขานอ้อยร้อยละ 5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ละลายกับน้ำกลั่น โดยใช้ความเข้มข้น เท่ากับ 10 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.50 0.55 0.60 0.65 และ 0.70 ใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียด (ทราย) ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 1.40 ใช้อัตราส่วนมวลรวมหยาบ (หิน 3/8”) ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 3.00 ทดสอบความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยวิธีการทดสอบหาค่ายุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C143 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM C39 ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ทำการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และทำการทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยวิธีไดน้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1138

##### 3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- 1) การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา ตามมาตรฐาน ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement
- 2) การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา ใช้การทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) ในการรายงานผลของออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา
- 3) การทดสอบความถ่วงจำเพาะของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C128 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates

4) การทดสอบความถ่วงจำเพาะของหิน ตามมาตรฐาน ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate

3.1.2 การทดสอบความสามารถในการทำงานได้

โดยการทดสอบหาค่ายุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับแรงอัด

ทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

3.1.4 การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำ ด้วยชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.1.5 การทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยวิธีใต้น้ำ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1138 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมิตรภาพสินธุ์ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์นำมาอบแห้งและบดละเอียดจนเหลือน้ำหนักอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.2.2 ตะกอนน้ำประปา

ตะกอนน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำประปา การประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดมหาสารคาม โดยนำตะกอนน้ำประปาที่ได้มาตากแดดให้แห้ง จากนั้นใช้ค้อนอย่างทุบให้มีความละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้ำตะแกรงเบอร์ 8 นำตะกอนน้ำประปาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเย็นตัวลงนำมาบดให้มีความละเอียดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



### 3.2.3 มวลรวมละเอียด

เลือกใช้ทรายแม่น้ำโดยการล้างทำความสะอาดแล้วตากให้แห้งจากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดเอาขนาดที่ต้องการ อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.2.4 มวลรวมหยาบ

3.2.4.1 ใช้หินปูนย่อยขนาด 3/8" จากโรงโม่หิน ส.อมรพรรณ(1993) อำเภอสีชมพู จังหวัดขอนแก่น นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8" และค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ล้างทำความสะอาดแล้วตากให้แห้ง

3.2.4.2 ใช้หินบะซอลต์ขนาด 3/8" จากโรงโม่หินบุรีรัมย์ อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8" และค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ล้างทำความสะอาดแล้วตากให้แห้ง

### 3.2.5 น้ำ

ใช้น้ำกลั่นในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้น้ำในการผสมจีโอโพลีเมอร์

ลิเมอร์คอนกรีต

### 3.2.6 สารเคมี

- 1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ให้นำมาเตรียมให้ได้ความเข้มข้น 10 โมลาร์ สารละลายดังกล่าวถูกเตรียมก่อนการใช้ผสมตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) มีองค์ประกอบทางเคมีของ  $\text{Na}_2\text{O}$  15.32% ,  $\text{SiO}_2$  32.87% และน้ำ 51.81% โดยน้ำหนัก

## 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve) ขนาดต่างๆ

3.3.2 เตาอบ อุณหภูมิ 100-110 C

3.3.3 ขวดมาตรฐานเลอว์ชาเตอลิเยร์ (Le Chatelier Flask)

3.3.4 เตาเผาความร้อนสูง อุณหภูมิ 500-700 C

3.3.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Balance) ขนาดวัดได้ละเอียดถึง 0.1%

3.3.6 เครื่องบดวัสดุแบบตกระแทก

3.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.8 เครื่องผสมคอนกรีต

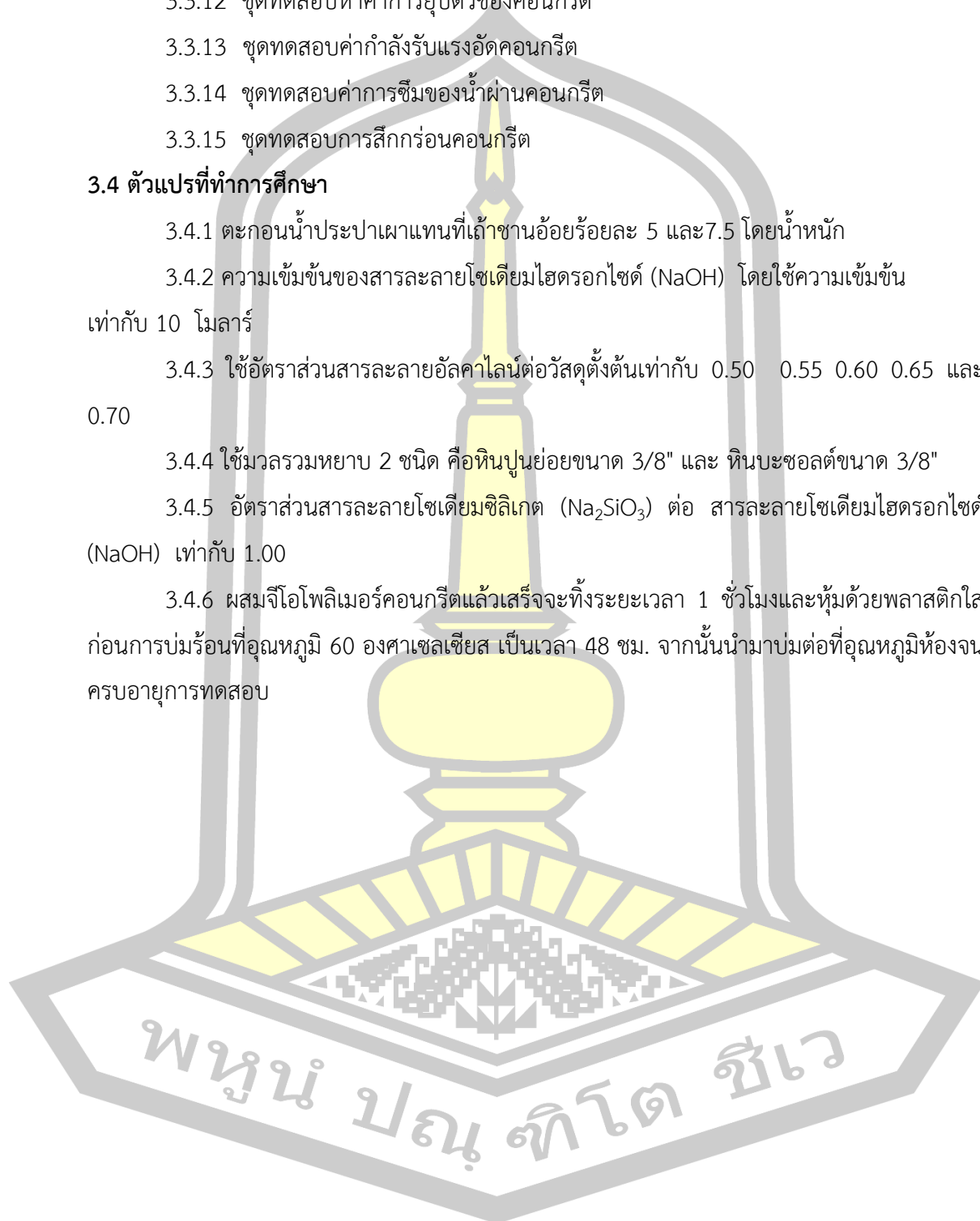
3.3.9 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 x 10 x 10 ซม.

3.3.10 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.

- 3.3.11 เครื่องตัดแท่งคอนกรีต
- 3.3.12 ชุดทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต
- 3.3.13 ชุดทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต
- 3.3.14 ชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต
- 3.3.15 ชุดทดสอบการสีกร่อนคอนกรีต

#### 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

- 3.4.1 ตะกอนน้ำประปาเผาแทนที่เถ้าขานอ้อยร้อยละ 5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก
- 3.4.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์
- 3.4.3 ใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.50 0.55 0.60 0.65 และ 0.70
- 3.4.4 ใช้มวลรวมหยาบ 2 ชนิด คือหินปูนย่อยขนาด 3/8" และ หินบะซอลต์ขนาด 3/8"
- 3.4.5 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ต่อ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 1.00
- 3.4.6 ผสมจีไอโพลีเมอร์คอนกรีตแล้วเสร็จจะทิ้งระยะเวลา 1 ชั่วโมงและหุ้มด้วยพลาสติกใปก่อนการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชม. จากนั้นนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบ



### 3.5 ส่วนผสมของซีโพลิเมอร์คอนกรีต

No	Mixtures	Type of Rock	WWS (%)	NS/NH	AL/B	1 Cube (kg/m <sup>3</sup> )					
						BA (kg.)	WWS (kg.)	NaOH (kg.)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg.)	Sand (kg.)	Rock (kg.)
1	L0.60W5.0	limestone	5.0	1	0.60	389.50	20.50	122.90	122.90	570.40	1,228.90
2	L0.55W5.0	limestone	5.0	1	0.55	389.50	20.50	112.95	112.95	576.70	1,242.50
3	L0.50W5.0	limestone	5.0	1	0.50	389.50	20.50	104.50	104.50	582.00	1,254.00
4	L0.60W7.5	limestone	7.5	1	0.60	379.25	30.75	122.90	122.90	570.40	1,228.90
5	L0.55W7.5	limestone	7.5	1	0.55	379.25	30.75	112.95	112.95	576.70	1,242.50
6	L0.50W7.5	limestone	7.5	1	0.50	379.25	30.75	104.50	104.50	582.00	1,254.00
7	B0.70W5.0	Basalt	5.0	1	0.70	389.50	20.50	149.10	149.10	553.70	1,193.00
8	B0.65W5.0	Basalt	5.0	1	0.65	389.50	20.50	134.70	134.70	562.80	1,212.70
9	B0.60W5.0	Basalt	5.0	1	0.60	389.50	20.50	122.90	122.90	570.40	1,228.90
10	B0.70W7.5	Basalt	7.5	1	0.70	379.25	30.75	149.10	149.10	553.70	1,193.00
11	B0.65W7.5	Basalt	7.5	1	0.65	379.25	30.75	134.70	134.70	562.80	1,212.70
12	B0.60W7.5	Basalt	7.5	1	0.60	379.25	30.75	122.90	122.90	570.40	1,228.90
13	L0.60W0.0	limestone	0	1	0.60	410.00	-	122.90	122.90	570.40	1,228.90
14	L0.55 W0.0	limestone	0	1	0.55	410.00	-	112.95	112.95	576.70	1,242.50
15	L0.50 W0.0	limestone	0	1	0.50	410.00	-	104.50	104.50	582.00	1,254.00
16	B0.70 W0.0	Basalt	0	1	0.70	410.00	-	149.10	149.10	553.70	1,193.00
17	B0.65 W0.0	Basalt	0	1	0.65	410.00	-	134.70	134.70	562.80	1,212.70
18	B0.60 W0.0	Basalt	0	1	0.60	410.00	-	122.90	122.90	570.40	1,228.90

คำอธิบายสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

abWc หมายถึงชื่อตัวอย่างในการทดสอบ โดยที่ a = ชนิดของหินที่ใช้ผสม

b = ปริมาณอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์, c = ร้อยละของปริมาณตะกอนน้ำประปาที่แทนที่ในแก้ว  
ชานอ้อย

WWS หมายถึง ตะกอนน้ำประปาเผา (Calcined Waste Water Sludge)

BA หมายถึง แก้วชานอ้อย (Bagasse Ash)

NH หมายถึง สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

NS หมายถึง สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

WWS : BA หมายถึง อัตราส่วนของตะกอนน้ำประปาเผาต่อแก้วชานอ้อย (Calcined Water Supply  
Sludge to Bagasse Ash Ratio)

AL/B หมายถึง อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น

### 3.6 ขั้นตอนการผลิตตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

- 1) เตรียมอุปกรณ์ในการผสม
- 2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ก่อนการผลิตจีโอโพลิเมอร์  
คอนกรีต 24 ชั่วโมง
- 3) ตวงสารละลาย ชั่งวัสดุตั้งต้น ทราบ หิน ตามส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้
- 4) นำแก้วชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผาที่ได้เตรียมไว้แล้ว ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วใส่ลงใน  
เครื่องผสมคอนกรีต ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 2.5 นาที
- 5) แล้วใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 2.5 นาที
- 6) หลังจากนั้นให้นำทราย ที่ได้เตรียมไว้แล้ว ใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ผสมต่อเนื่องให้เป็นเนื้อ  
เดียวกัน เป็นเวลา 2.5 นาที
- 7) ใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกต ใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ผสมต่อเนื่องให้เป็นเนื้อเดียวกัน เป็น  
เวลา 2.5 นาที
- 8) ขั้นตอนสุดท้ายให้นำหิน ที่ได้เตรียมไว้แล้ว ใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ผสมต่อเนื่องให้เป็นเนื้อ  
เดียวกัน เป็นเวลา 2.5 นาที
- 9) เก็บตัวอย่างโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. โดยการเทคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ชั้น  
แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง ทำการปาดหน้าให้เรียบโดยใช้เวลาในการหล่อ  
คอนกรีตตัวอย่างละประมาณ 1-2 นาทีต่อคอนกรีต 1 ก้อน

10) การบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ทำการปิดแบบหล่อตัวอย่างด้านบนด้วยพลาสติกใสทั้งแบบหล่อเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ จากนั้นค่อยนำเข้าไปบ่มในตู้อบตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นค่อยนำออกจากตู้อบแล้วทำการบ่มในอุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบการซึมผ่านของน้ำต่อไป

### 3.7 การทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

#### 3.7.1 ทดสอบหาค่ายุบตัว

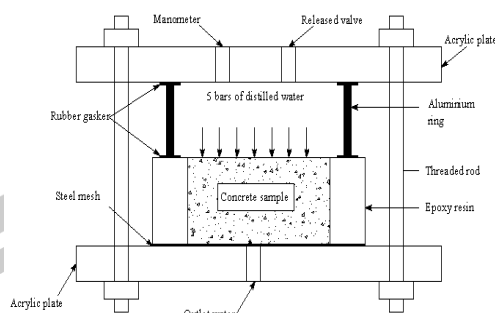
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 เครื่องมือประกอบด้วยกรวยตัดและเหล็กกระทุ้ง กรวยตัดตอนบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. ตอนล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มม. สูง 305 มม. มีหูจับและมีแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท่าเทียมทั้งสองข้าง ส่วนเหล็กกระทุ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ปลายกลมมน โดยบรรจุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสดในกรวยตัดเป็น 3 ชั้นๆ ละปริมาณเท่ากันโดยปริมาตร กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง กระจายให้ทั่วถึงตลอดหน้าตัด เมื่อครบ 3 ชั้นจึงใช้เหล็กกระทุ้งปาดหน้าคอนกรีตให้ได้ระดับกับขอบกรวย เมื่อยกขึ้นในแนวตั้ง คอนกรีตภายใต้น้ำหนักของตัวเองจะยุบตัวลงมา บอกระดับความสามารถเทได้ของคอนกรีตกับค่าการยุบตัว ลักษณะการยุบตัวของคอนกรีตที่พบมีอยู่ 3 แบบคือ การยุบตัวจริง (True Slump) การยุบตัวเฉือน (Shear Slump) และการยุบตัวหวบ (Collapse Slump)

#### 3.7.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน

#### 3.7.3 ทดสอบการหาค่าการซึมผ่านของน้ำ

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตอาศัยหลักการไหลของน้ำ ทำได้โดยนำตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่มีอายุครบตามกำหนดการทดสอบ มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่างโดยให้มีขนาดความสูง 4 ซม. แล้วทำความสะอาดผิวของก้อนตัวอย่างให้สะอาดปราศจากฝุ่น หลังจากนั้นทำการหล่ออีพอกซี (Epoxy) ที่ด้านข้างของตัวอย่างให้มีความหนา 2.5 ซม. จากผิวตัวอย่างคอนกรีตและสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 2 ชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

หลังจากหล่ออิพอกซีเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชม. จึงนำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับชุดทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากนั้นให้ความดันคงที่ด้วยความดัน 5 บาร์ เพื่อให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต บันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างกับเวลา เมื่ออัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าคงที่ จึงนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตตามสมการ

$$K = \frac{\rho l g Q}{PA} \quad (3.1)$$

โดย  $K$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (m/s)

$\rho$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (kg/m<sup>3</sup>)

$l$  = ความหนาของตัวอย่างของตัวอย่าง (m)

$Q$  = อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่าง (m<sup>3</sup>/s)

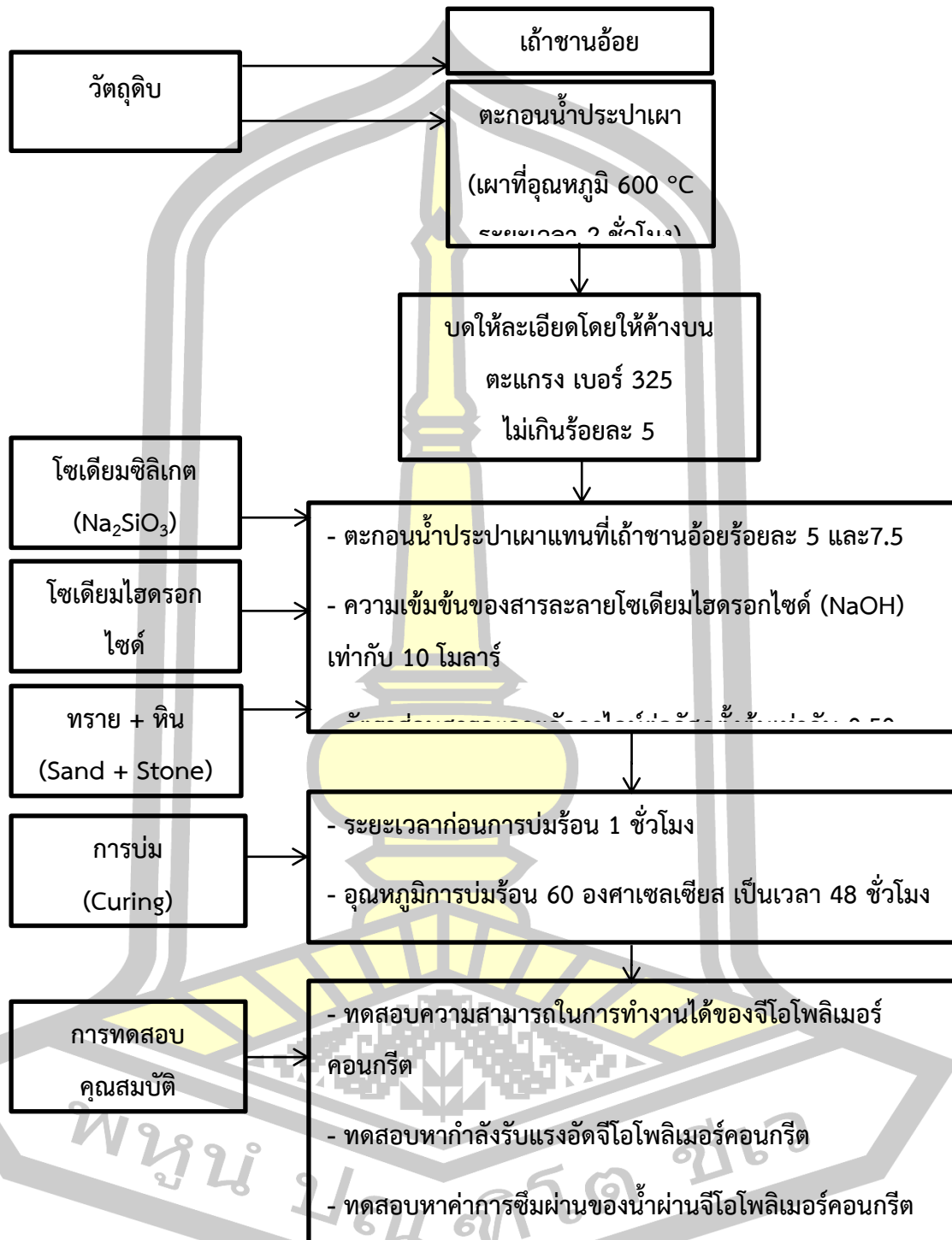
$P$  = ความดันน้ำ (Pascal)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของหน้าตัดตัวอย่าง (m<sup>2</sup>)

#### 3.7.4 การทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยวิธีได้น้ำ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1138 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method) เป็นมาตรฐานล่าสุดในการหาค่าการสึกกร่อน โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม. หนา 100 มม. ไปติดตั้งไว้ในถังทดสอบ และมีลูกโลหะสแตนเลสกลม 3 ขนาด ที่มีจำนวนแตกต่างกัน ถูนำมาวางอยู่บนผิวหน้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ทำการเติมน้ำสะอาดให้สูงกว่าผิวคอนกรีตประมาณ 16 ซม. แล้วกวนน้ำในถังด้วยใบพัดขนาดตามมาตรฐานกำหนด ด้วยความเร็ว 1,000+/-100 รอบต่อนาที ลูกโลหะสแตนเลสกลมทั้ง 3 ขนาดก็จะเคลื่อนที่ตามการไหลวนของน้ำไปมาบนผิวของก้อนตัวอย่าง เมื่อครบ 12 ชม. จะนำตัวอย่างคอนกรีตออกมาทำความสะอาดและประเมินการสึกกร่อนด้วยการชั่งน้ำหนัก เสร็จแล้วก็นำตัวอย่างกลับไปในถังทดสอบอีกครั้งเพื่อทำตามกระบวนการเดิมอีกจำนวน 5 รอบ เมื่อเสร็จแล้วก็ทำการคำนวณหาอัตราการสึกกร่อนของตัวอย่างคอนกรีต

### 3.8 แผนการดำเนินการวิจัยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 3 แผนการดำเนินงานวิจัยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

##### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าขานอ้อย ตะกอนน้ำประปาเผา มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อย (BA) ตะกอนน้ำประปาเผา (WWS) หาได้โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 มวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C128 และมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C127 พบว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อย ตะกอนน้ำประปาเผาทราย หินปูนย่อยและหินบะซอลต์เท่ากับ 2.34 2.40 2.60 2.68 และ 2.75 ตามลำดับ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136 มีค่าเท่ากับ 2.73 ค่าการดูดซึมน้ำของทราย หินปูนย่อยและหินบะซอลต์เท่ากับ 0.86 0.50 และ 2.15 ตามลำดับ และทำการทดสอบหาขนาดและความละเอียดของเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา ตามมาตรฐาน ASTM C204 หลังผ่านกระบวนการบดเพื่อเพิ่มความละเอียดแล้ว ทำการทดสอบเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา ด้วยวิธีการร่อนน้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 325 พบว่ามีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3 และ 2 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสความละเอียด	การดูดซึมน้ำ	ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)
BA	2.34	-	-	3
WWS	2.40	-	-	2
Sand	2.60	2.73	0.86	-
Limestone	2.68	-	0.50	-
Basalt	2.75	-	2.15	-



#### 4.1.2 ผลการทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบของเถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา

โดยทำการทดสอบด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) สามารถระบุออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าเถ้าชานอ้อยมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก และมีอยู่ในปริมาณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในส่วนของตะกอนน้ำประปาเผา มี  $\text{SiO}_2$  สูงเช่นเดียวกัน พร้อมทั้งมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  อยู่พอสมควร

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

Chemical Composition (%)	BA	WWS
$\text{SiO}_2$	68.25	39.43
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.83	8.88
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4.05	4.49
CaO	11.92	1.60
MgO	1.42	1.36
$\text{SO}_3$	0.15	N.D.

#### 4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยวิธีทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C 143 ค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump) ควรจะมีพอเพียงสำหรับการเทคอนกรีตเข้าแบบและสามารถอัดให้แน่นได้โดยไม่เป็นโพรง ซึ่งค่ายุบตัวของคอนกรีตสำหรับงานประเภทต่างๆจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะความซับซ้อนของโครงสร้าง และพื้นที่สำหรับการจี้เขย่า ซึ่งค่าการยุบตัวที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ มาตรฐาน ว.ส.ท. E.I.T Standard 1014-40 แสดงในตารางที่ 4 ทั้งนี้ในการเทคอนกรีตอาจใช้ค่าการยุบตัวที่มากกว่าที่กำหนดในตารางได้ โดยอาจพิจารณาจากความเหมาะสมกับขั้นตอนการทำงาน ลักษณะโครงสร้าง และสภาพแวดล้อมการทำงานที่แตกต่าง

ตารางที่ 4 การยุบตัวที่เหมาะสมตามข้อกำหนด วสท.

ประเภทของงาน	ค่าการยุบตัว(เซนติเมตร)
พื้นถนน	3.0 – 8.0
โครงสร้างทั่วไป	5.0 – 10.0
เสาหรือผนังบาง	7.5 – 12.5
โครงสร้างที่เหล็กเสริมแน่น	10.0 – 15.0

การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ตามตารางที่ 5 พบว่าอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น AL/B มีผลต่อค่าการยุบตัวเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างภาพที่ 4 ส่วนผสมที่ผสมด้วยหินปูนย่อย อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.50 นั้น การยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเพียง 5-15 มม. ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ไม่ดีนัก และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.55 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 15-33 มม. และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.60 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 38-68 มม. ภาพที่ 5 ส่วนผสมที่ผสมด้วยหินบะซอลต์ อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.60 นั้น การยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเพียง 10-38 มม. และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.65 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 20-53 มม. และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.70 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 34-135 มม.

พิจารณาวิธีการทดสอบการยุบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาโดยการแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา พบว่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามการแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา จากภาพที่ 5 ยกตัวอย่างค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.70 มีค่าการยุบตัวมากที่สุดเท่ากับ 135 มิลลิเมตร ที่การแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก ค่ายุบตัวที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 34 มิลลิเมตร ที่การแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 0 หรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าชานอ้อยเพียงอย่างเดียว

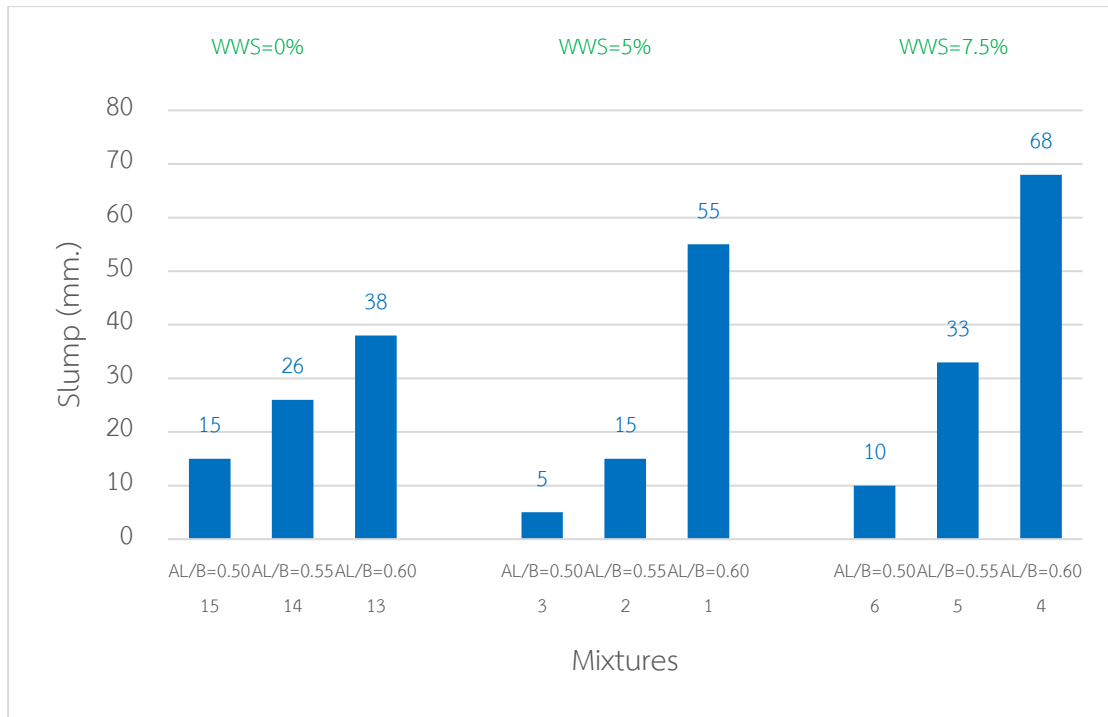
ในส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 ส่วนผสมที่ใช้หินปูนย่อยเป็นส่วนผสม จะมีค่าการยุบตัวที่ค่อนข้างสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้หินบะซอลต์ ยกตัวอย่างอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.60 ที่การแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 0 ส่วนผสมที่ผสมหินปูนย่อยมีค่าการยุบตัว 38 มิลลิเมตร ส่วนผสมหินบะซอลต์มีค่าการยุบตัว 10 มิลลิเมตร การแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 ส่วนผสมที่ผสมหินปูนย่อยมีค่าการยุบตัว 55 มิลลิเมตร ส่วนผสมหินบะซอลต์มีค่าการยุบตัว 15 มิลลิเมตร และ

การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 ส่วนผสมที่ผสมหินปูนย่อยมีค่าการยุบตัว 68 มิลลิเมตร ส่วนผสมหินบะซอลต์มีค่าการยุบตัว 38 มิลลิเมตร

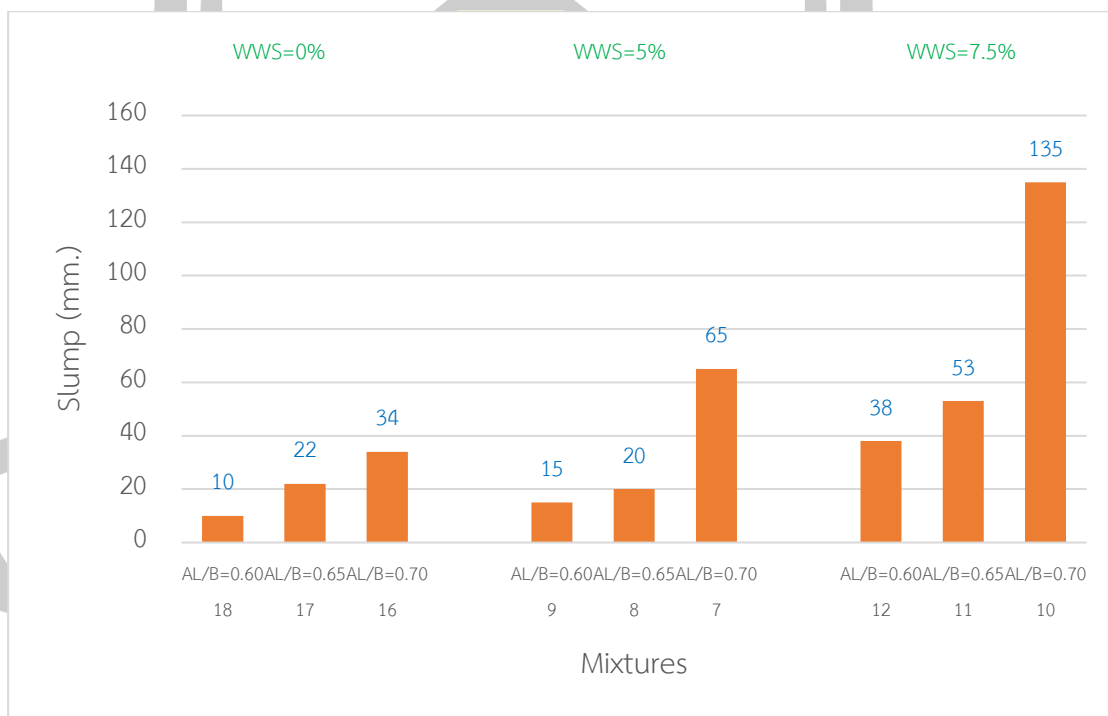
พิจารณาผลการทดสอบการยุบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาโดยการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 และ 7.5 เทียบกับส่วนผสมที่มีเถ้าขานอ้อยเพียงอย่างเดียว พบว่าในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยิ่งเติมตะกอนน้ำประปาแทนที่เถ้าขานอ้อยปริมาณสูงขึ้นเรื่อยๆ พบว่าการยุบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยิ่งมีค่าสูงตามไปด้วย ทั้งนี้อาจเกิดจากตะกอนน้ำประปาที่ผ่านการเผาและบดละเอียดจนมีอนุภาคเล็กกลวง ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 มีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถทำงานได้หรือการยุบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แต่ก็มีผลเสียต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน

ตารางที่ 5 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

No.	Mixtures	Type of Rock	WWS (%)	AL/B	Slump (mm.)
1	L0.60W5.0	limestone	5.0	0.60	55
2	L0.55W5.0	limestone	5.0	0.55	15
3	L0.50W5.0	limestone	5.0	0.50	5
4	L0.60W7.5	limestone	7.5	0.60	68
5	L0.55W7.5	limestone	7.5	0.55	33
6	L0.50W7.5	limestone	7.5	0.50	10
7	B0.70W5.0	Basalt	5.0	0.70	65
8	B0.65W5.0	Basalt	5.0	0.65	20
9	B0.60W5.0	Basalt	5.0	0.60	15
10	B0.70W7.5	Basalt	7.5	0.70	135
11	B0.65W7.5	Basalt	7.5	0.65	53
12	B0.60W7.5	Basalt	7.5	0.60	38
13	L0.60W0.0	limestone	0.0	0.60	38
14	L0.55W0.0	limestone	0.0	0.55	26
15	L0.50W0.0	limestone	0.0	0.50	15
16	B0.70W0.0	Basalt	0.0	0.70	34
17	B0.65W0.0	Basalt	0.0	0.65	22
18	B0.60W0.0	Basalt	0.0	0.60	10



ภาพที่ 4 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ผสมหินปูนย่อย)



ภาพที่ 5 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ผสมหินปะชอลต์)

#### 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา

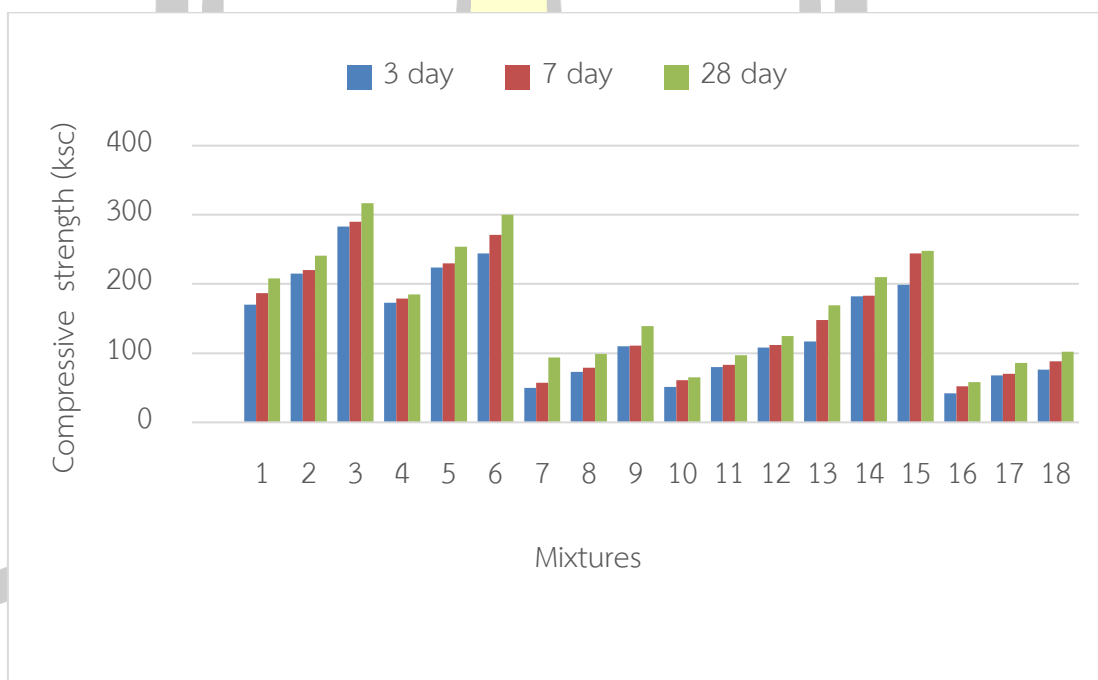
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาโดยการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา พบว่าผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่าง ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกันกับการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตปกติที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเชื่อมประสาน โดยภาพที่ 6 แสดงการพัฒนา กำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ของส่วนผสมที่ 1-12 และพบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ ส่วนผสมที่ 3 เท่ากับ 317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อตัวอย่างอายุ 28 วัน โดยใช้ส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.50 และหินปูนย่อยเป็นมวลรวมหยาบ ในส่วนผสมที่ 13-15 เป็นส่วนผสมควบคุมโดยไม่ใช้ตะกอนน้ำประปาเผาเป็นส่วนผสม อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) อยู่ระหว่าง 0.50-0.60 ใช้หินปูนย่อยเป็นมวลรวมหยาบ ในส่วนผสมที่ 16-18 เป็นส่วนผสมควบคุมโดยไม่ใช้ตะกอนน้ำประปาเผาเป็นส่วนผสมเช่นเดียวกัน อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) อยู่ระหว่าง 0.60-0.70 ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา

No.	Mixtures	WWS (%)	AL/B	Compressive strength (ksc)		
				3 day	7 day	28 day
1	L0.60W5.0	5.0	0.60	170	187	208
2	L0.55W5.0	5.0	0.55	215	220	241
3	L0.50W5.0	5.0	0.50	283	290	317
4	L0.60W7.5	7.5	0.60	173	179	185
5	L0.55W7.5	7.5	0.55	224	230	254
6	L0.50W7.5	7.5	0.50	244	271	300
7	B0.70W5.0	5.0	0.70	50	57	94
8	B0.65W5.0	5.0	0.65	73	79	99
9	B0.60W5.0	5.0	0.60	110	111	139
10	B0.70W7.5	7.5	0.70	51	61	65
11	B0.65W7.5	7.5	0.65	80	83	97

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (ต่อ)

No.	Mixtures	WWS (%)	AL/B	Compressive strength (ksc)		
				3 day	7 day	28 day
12	B0.60W7.5	7.5	0.60	108	112	125
13	L0.60W0.0	0.0	0.60	117	148	169
14	L0.55W0.0	0.0	0.55	182	183	210
15	L0.50W0.0	0.0	0.50	199	244	248
16	B0.70W0.0	0.0	0.70	42	52	58
17	B0.65W0.0	0.0	0.65	68	70	86
18	B0.60W0.0	0.0	0.60	76	88	102



ภาพที่ 6 แสดงการพัฒนาของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อย

#### 4.3.1 ผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา

การพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 5.0-7.5 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปของกำลังรับแรงอัดในตารางที่ 7 และ 8 พบว่าตะกอนน้ำประปาเผามีส่วนช่วยให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น

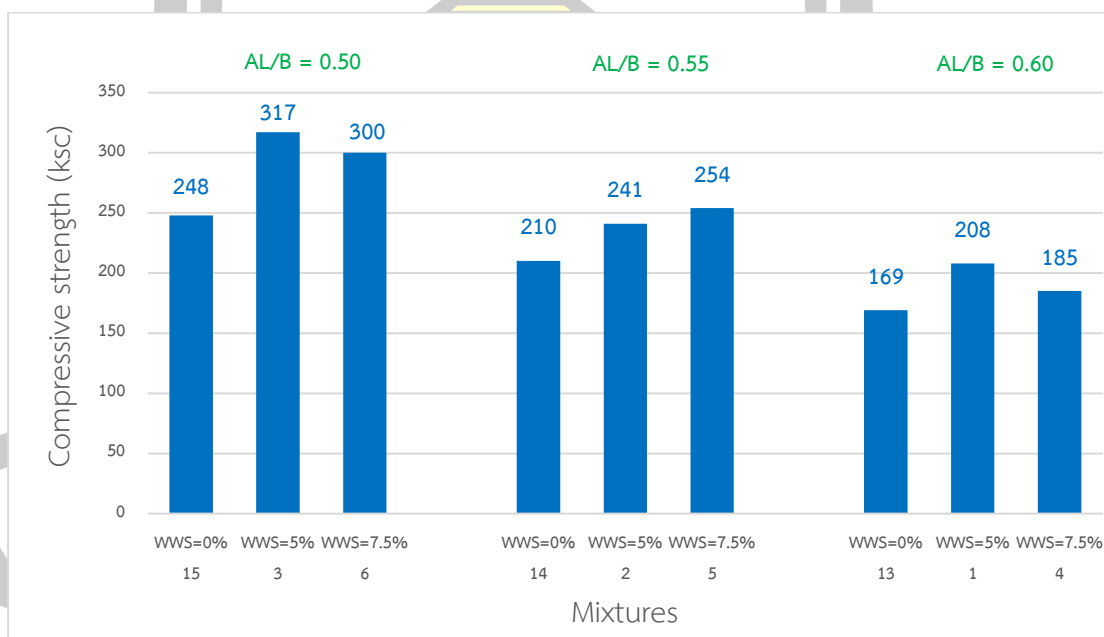
โดยส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 และ 0.60 การแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 ให้กำลังสูงสุดในกลุ่มเดียวกัน แต่ส่วนอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 นั้น การแทนที่ร้อยละ 7.5 นั้นให้ผลดีที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8 การแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวข้นมากขึ้น เนื่องจากตะกอนน้ำประปามีการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างสูง ซึ่งในกลุ่มอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 พบว่าการแทนที่ร้อยละ 5 ให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสูงที่สุดในการศึกษาในครั้งนี้ และเมื่อเพิ่มปริมาณของเหลวในส่วนผสมหรือเพิ่ม AL/B เป็น 0.55 พบว่าการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาร้อยละ 7.5 ให้กำลังอัดสูงสุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากการสมดุลระหว่างของเหลวที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณตะกอนน้ำประปาที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดี เมื่อเพิ่มปริมาณ AL/B เป็น 0.60 กลับพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5 ด้วยตะกอนน้ำประปาให้กำลังสูงสุดในกลุ่มนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา[10],[11] ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการเพิ่มปริมาณตะกอนน้ำประปานั้น จะมีส่วนของวัสดุเฉื่อยหรืออนุภาคของดินเหนียว[12] ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นส่วนที่ไม่แข็งแรงภายในของเฟสดี ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์เซชันที่ไม่สมบูรณ์[13] ประกอบกับปริมาณของเถ้าชานอ้อยที่ลดลง จึงอาจส่งผลให้การชะล้าง  $\text{SiO}_2$  ได้ปริมาณน้อยลงและมีอัตราส่วนโมลที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตลดลง จากตารางที่ 7 และตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมที่ไม่เติมตะกอนน้ำประปาเผา กับส่วนผสมที่เติมตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 และ 7.5 พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 - 35 เลยกี่เดียว สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ อธิกา วงศ์วานกลม (2553) ซึ่งพบว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่เถ้าชานอ้อยร้อยละ 5 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 33.69 และงานวิจัยของ วรยศ วิฑูรธีรคานต์ (2556) พบว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้ตะกอนน้ำประปาเผาแทนที่เถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 21 แต่ถ้าใช้ตะกอนน้ำประปาเผาแทนที่เถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 - 40 กลับพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ต่ำกว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยเพียงอย่างเดียว

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ตารางที่ 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขาน  
อ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (ผสมหินปูนย่อย)

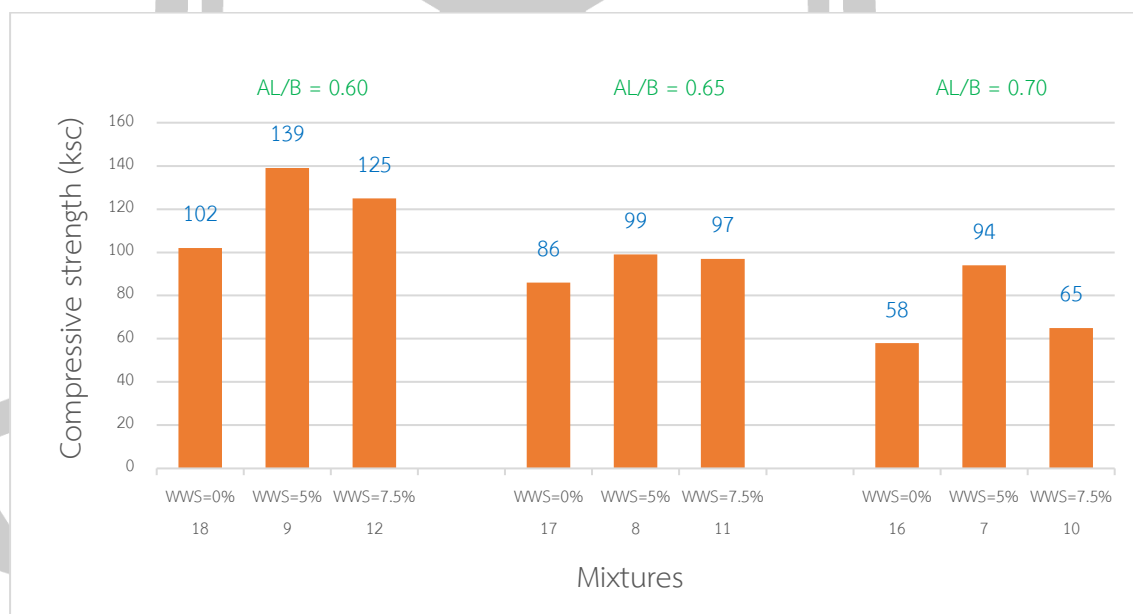
No.	Mixtures	WWS (%)	AL/B	Compressive strength (ksc)				Ratio of Comp.
				3 day	7 day	28 day	Average	
15	L0.50W0.0	0.0		199	244	248	230	1.00
3	L0.50W5.0	5.0		283	290	317	297	1.29
6	L0.50W7.5	7.5	0.50	244	271	300	272	1.18
14	L0.55W0.0	0.0		182	183	210	192	1.00
2	L0.55W5.0	5.0	0.55	215	220	241	225	1.17
5	L0.55W7.5	7.5		224	230	254	236	1.23
13	L0.60W0.0	0.0		117	148	169	145	1.00
1	L0.60W5.0	5.0	0.60	170	187	208	188	1.30
4	L0.60W7.5	7.5		173	179	185	179	1.23



ภาพที่ 7 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อมีการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (หินปูนย่อย)

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขาน  
อ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (ผสมหินปะชอลต์)

No.	Mixtures	WWS (%)	AL/B	Compressive strength (ksc)				Ratio of Comp.
				3 day	7 day	28 day	Average	
18	B0.60W0.0	0.0		76	88	102	89	1.00
9	B0.60W5.0	5.0		110	111	139	120	1.35
12	B0.60W7.5	7.5	0.60	108	112	125	115	1.29
17	B0.65W0.0	0.0		68	70	86	75	1.00
8	B0.65W5.0	5.0	0.65	73	79	99	84	1.12
11	B0.65W7.5	7.5		80	83	97	87	1.16
16	B0.70W0.0	0.0		42	52	58	51	1.00
7	B0.70W5.0	5.0	0.70	50	57	94	67	1.31
10	B0.70W7.5	7.5		51	61	65	59	1.16



ภาพที่ 8 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อมีการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (หินปะชอลต์)

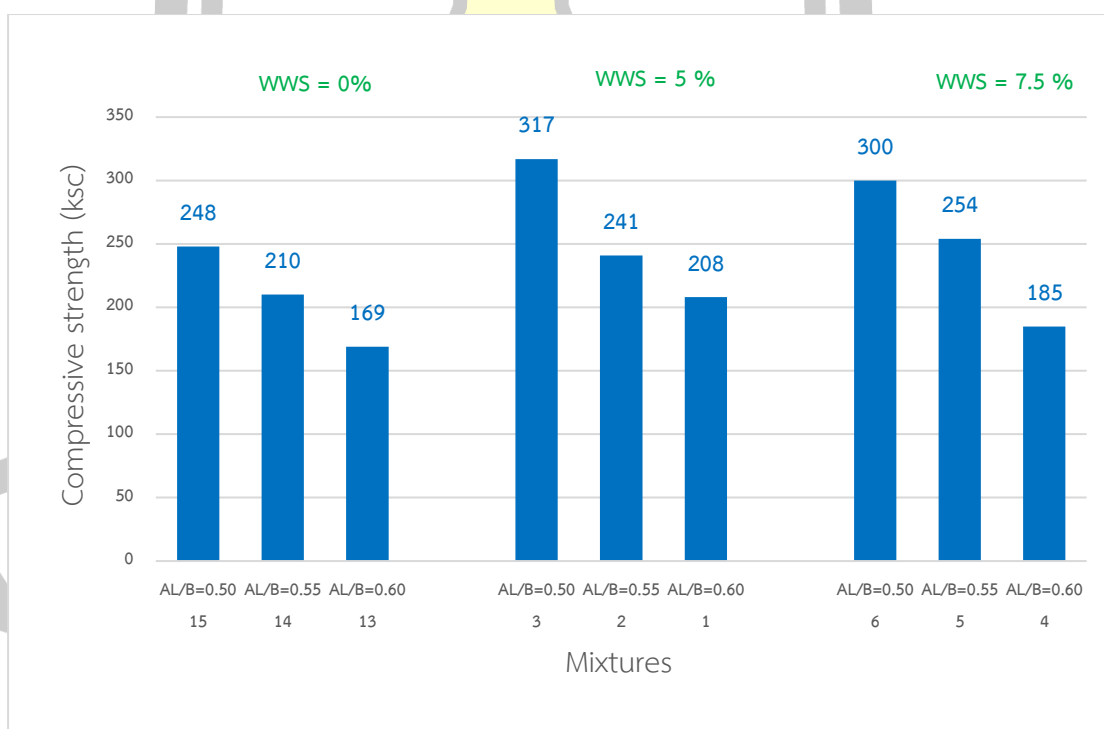
#### 4.3.2 ผลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.50 0.55 และ 0.60 ตามลำดับ ภาพที่ 9 และอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.60 0.65 และ 0.70 ตามลำดับ ในภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) พบว่าส่วนผสมที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.50 นั้น การยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเพียง 5-15 มม. ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานไม่ดีขึ้น และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.60 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 38-68 มม. ดังแสดงตามตารางที่ 9 ในส่วนตารางที่ 10 ที่ใช้หินบะชอลต์เป็นมวลรวมหยาบพบว่าส่วนผสมที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.60 นั้น การยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเพียง 10-38 มม. ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานไม่ดีขึ้น และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.70 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 34-135 มม. ถ้าเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปก็ยังถือว่าอยู่ในช่วงต่ำ แต่ก็สามารถทำงานได้ สำหรับค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้น มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เพิ่มขึ้น[14] และมีการรายงานว่าอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) ที่ต่ำจะทำให้การเร่งการชะละลายออกไซด์ออกมาจากวัสดุตั้งต้นอีกด้วย[15] ตามลำดับ พฤติกรรมนี้คล้ายกับกฎของ Abrams [16] ที่ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีความมากขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง ซึ่งในปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์อาจจะมีน้ำโดยกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 และค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อ AL/B เพิ่มขึ้นเป็น 0.55 และ 0.60 ส่วนเกิน (Excess water) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์แล้วทำให้เกิดโพรงภายในเนื้อของคอนกรีตและส่งผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต แต่เมื่อพิจารณาในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแล้วพบว่า อัตราส่วน AL/B ที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้ความชื้นเหนียวลดลงและค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น[17]

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) (หินปูนย่อย)

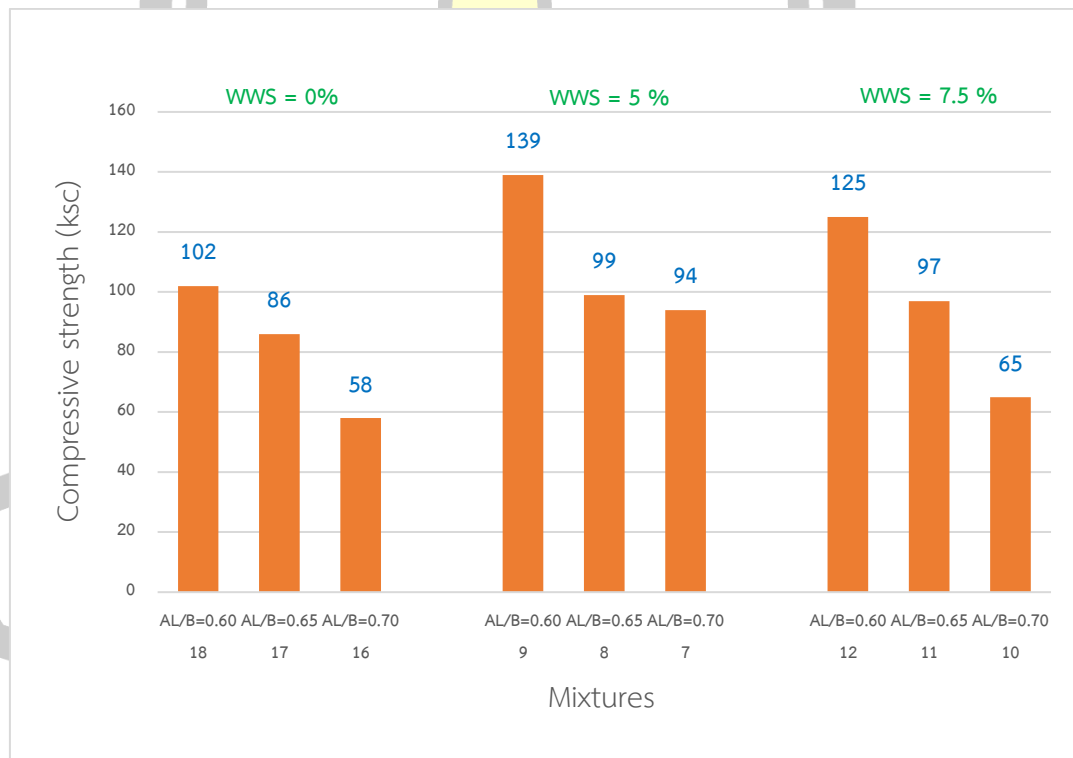
No.	Mixtures	AL/B	WWS (%)	Slump (mm.)	Compressive strength (ksc)		
					3 day	7 day	28 day
15	L0.50W0.0	0.50	0.0	15	199	244	248
14	L0.55W0.0	0.55		26	182	183	210
13	L0.60W0.0	0.60		38	117	148	169
3	L0.50W5.0	0.50	5.0	5	283	290	317
2	L0.55W5.0	0.55		15	215	220	241
1	L0.60W5.0	0.60		55	170	187	208
6	L0.50W7.5	0.50	7.5	10	244	271	300
5	L0.55W7.5	0.55		33	224	230	254
4	L0.60W7.5	0.60		68	173	179	185



ภาพที่ 9 ผลของอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน (หินปูนย่อย)

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) (หินปะชอลต์)

No.	Mixtures	AL/B	WWS (%)	Slump (mm.)	Compressive strength (ksc)		
					3 day	7 day	28 day
18	B0.60W0.0	0.60	0.0	10	76	88	102
17	B0.65W0.0	0.65		22	68	70	86
16	B0.70W0.0	0.70		34	42	52	58
9	B0.60W5.0	0.60	5.0	15	110	111	139
8	B0.65W5.0	0.65		20	73	79	99
7	B0.70W5.0	0.70		65	50	57	94
12	B0.60W7.5	0.60	7.5	38	108	112	125
11	B0.65W7.5	0.65		53	80	83	97
10	B0.70W7.5	0.70		135	51	61	65



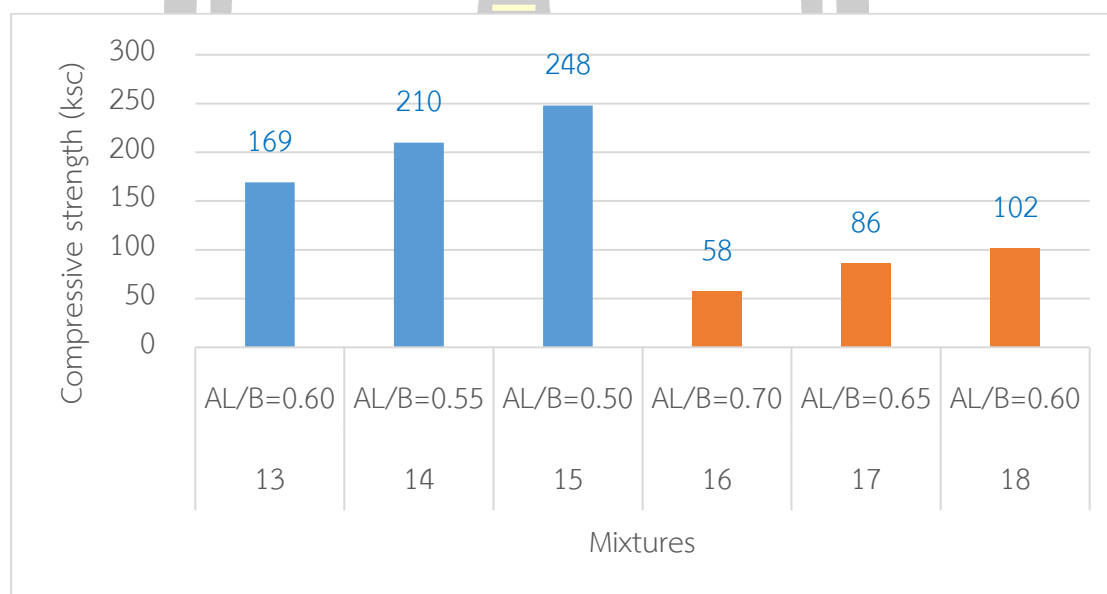
ภาพที่ 10 ผลของอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน (หินปะชอลต์)

### 4.3.3 ผลกระทบจากมวลรวมหยาบ 2 ชนิดที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

จากผลของการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากหินปูนย่อยมีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากหินบะซอลต์ค่อนข้างมากทั้งนี้อาจเนื่องจากความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพของหินทั้ง 2 ชนิด ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้กล่าวถึงค่าการดูดซึมน้ำของหินบะซอลต์ที่มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าหินปูนย่อย เพราะหินบะซอลต์มีโพรงขนาดเล็กอยู่ภายในเนื้อหินเป็นจำนวนมาก[18],[19],[20] หินบะซอลต์เป็นหินภูเขาไฟหรือหินอัคนีพุชนิดหนึ่งเกิดจากการที่ลาวาหรือหินหนืดขึ้นมาบนผิวโลกและมีการแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส และมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลึกแร่ขนาดละเอียดหรือมีเนื้อดอก (Porphyritic texture) (รายงานวิชาการ ฉบับที่ สทสร 4/2561 , สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี) หินบะซอลต์ในประเทศไทยพบมากในจังหวัดจันทบุรี ตราด กาญจนบุรี แพร่ บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ เชียงราย และลำปาง มีลักษณะเนื้อละเอียด มีสีเข้ม เช่น เทาเข้มถึงดำ น้ำตาลเข้ม ส่วนมากมีรูพรุนหรือฟองอากาศในเนื้อหิน คุณสมบัติมีความถ่วงจำเพาะ 2.5-2.8 ความพรุน 7-25 % กำลังวัสดุอัด 90-200 MPa กำลังวัสดุดึง 7-25 MPa กำลังวัสดุเฉือน 12-40 MPa ประโยชน์ใช้เป็นหินก่อสร้าง ทำถนน และหินโรยทางรถไฟ (การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี จังหวัดบุรีรัมย์:กรมทรัพยากรธรณี) จากผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมหยาบพบว่าหินปูนย่อยมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.68 และมีการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.50 ส่วนหินบะซอลต์มีความถ่วงจำเพาะ 2.75 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 2.14 ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำของหินบะซอลต์สูงกว่าหินหินปูนย่อยถึง 4 เท่า สอดคล้องกับการรายงานที่ผ่านมา[21] และด้วยลักษณะเช่นนี้อาจเป็นเหตุที่ทำให้น้ำหรือส่วนของสารละลายจะถูกดูดซึมเข้าไปจำนวนหนึ่ง ทำให้ปริมาณสารละลายที่จะทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่เป็นเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาแพมน้อยกว่าส่วนผสมที่ใช้หินปูนย่อย ความสามารถในการระเหยออกไต่ออกมาที่ลดต่ำลง และผลกระทบจากการที่มีสารละลายในส่วนผสมเหลือน้อยกว่าอีกอย่างที่สำคัญคือ ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จะมีความชื้นเหนียวที่ค่อนข้างสูง เป็นการยากในการทำให้เนื้อแน่น และอาจเกิดโพรงภายในเนื้อวัสดุ และกระทบต่อการรับกำลังในที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันสำหรับส่วนผสมที่ 13 และ 18 มีอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.60 ใช้หินปูนย่อยและหินบะซอลต์ตามลำดับได้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 169 และ 102 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์จากหินปูนย่อยมีกำลังอัดที่ดีกว่า ดังแสดงตามตารางที่ 11 และภาพที่ 11

ตารางที่ 12 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากมวลรวมหยาบ 2 ชนิด

No.	Mixtures	Type of Rock	AL/B	Compressive strength (ksc)		
				3 day	7 day	28 day
13	L0.60W0.0	limestone	0.60	117	148	169
14	L0.55W0.0	limestone	0.55	182	183	210
15	L0.50W0.0	limestone	0.50	199	244	248
16	B0.70W0.0	Basalt	0.70	42	52	58
17	B0.65W0.0	Basalt	0.65	68	70	86
18	B0.60W0.0	Basalt	0.60	76	88	102



ภาพที่ 11 ผลกระทบจากมวลรวมหยาบ 2 ชนิดที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

#### 4.4 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยเลือกทดสอบกับชุดตัวอย่าง 4 ชุดที่มีกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด จากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมด้วยหินปูนย่อย โดยทดสอบหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 12 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากหินปูนย่อยในส่วนผสมที่ 2 3 14 และ 15 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ  $2.38 \times 10^{-8}$   $1.37 \times 10^{-9}$   $5.78 \times 10^{-10}$  และ  $6.49 \times 10^{-9}$  เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในส่วนผสมที่ 2 มีอัตราการซึมผ่านน้ำในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ  $2.38 \times 10^{-8}$  เมตรต่อวินาที

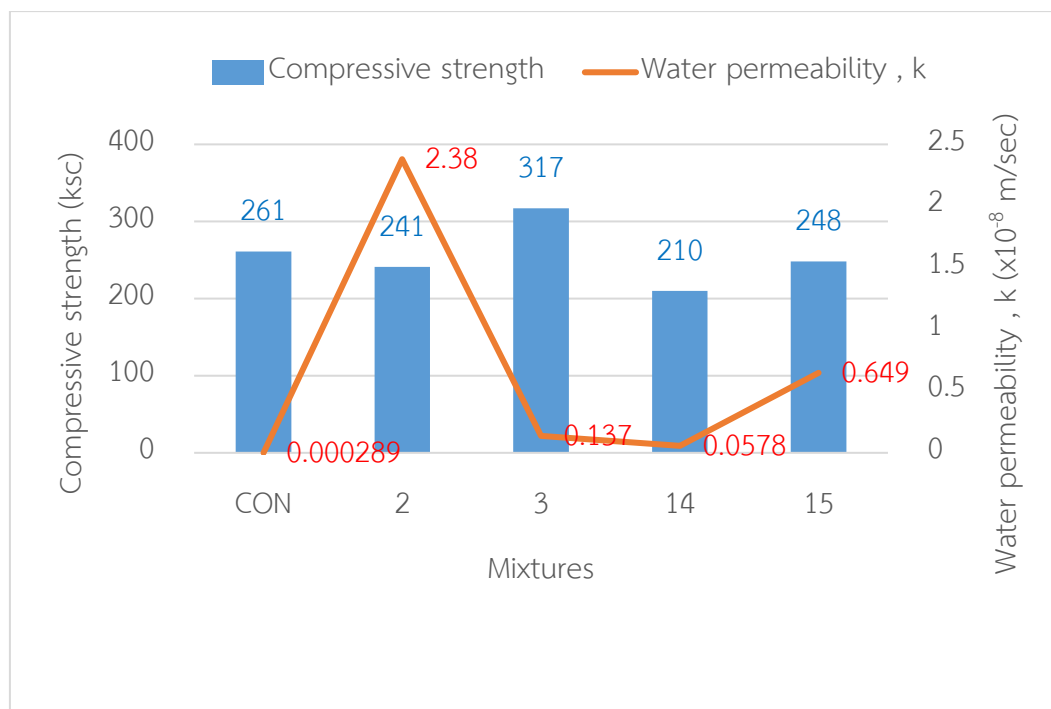


ส่วนผสมที่ 14 และ 15 ซึ่งเป็นส่วนผสมควบคุมโดยไม่มีการเติมตะกอนน้ำประปาเผาในส่วนผสม ใช้ อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.55 และ 0.50 มีอัตราการซึมผ่านน้ำในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ  $5.78 \times 10^{-10}$  และ  $6.49 \times 10^{-9}$  เมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณาผลการซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ในส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาในการผลิตจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่ 2 และ 3 พบว่าที่ส่วนผสมมีค่าการซึมผ่านของน้ำที่มากกว่า ส่วนผสมที่ 14 และ 15 ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ทั้ง 4 ส่วนผสมกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเท่ากับ  $2.89 \times 10^{-12}$  เมตรต่อวินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเป็นอย่างมาก และมากที่สุดที่ส่วนผสมที่ 2 ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมถึง 8,235 เท่าเลยทีเดียว ทั้งนี้การเติมตะกอนน้ำประปาเผาในส่วนผสมอาจไม่ส่งผลดีมากนัก ในแง่ของการซึมผ่านของน้ำ เพราะจากหลายงานวิจัยพบว่าข้อเสียของตะกอนน้ำประปาคือการดูดน้ำ ทำให้เมื่อนำไปเป็นวัสดุตั้งต้นในการทำจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมจะมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 12

ตารางที่ 13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

No.	Mixtures	Water Permeability , k (m/sec)	Ratio of Water Permeability , k/k <sub>CON</sub>	Compressive strength 28 days (ksc)
-	CON	$2.89 \times 10^{-12}$	1.00	261
2	L0.55W5.0	$2.38 \times 10^{-8}$	8,235	241
3	L0.50W5.0	$1.37 \times 10^{-9}$	474	317
14	L0.55W0.0	$5.78 \times 10^{-10}$	200	210
15	L0.50W0.0	$6.49 \times 10^{-9}$	2,246	248

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

#### 4.5 การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

สมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อระบบโครงสร้าง ทำให้สามารถใช้งานอาคารได้ดี ยืดระยะเวลาของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตออกไปให้นานมากขึ้น และการสึกกร่อนของคอนกรีตก็นับว่าเป็นตัวแปรหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความทนทานของคอนกรีต โดยการสึกกร่อนเกิดจากวัสดุประสานบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตเริ่มหลุดลอกจากการขัดสี ทำให้เกิดความเสียหายหรือร่องรอยต่างๆ ในบริเวณขนาดเล็กและขยายออกเป็นบริเวณกว้าง สามารถทำให้เกิดความเสียหายกับคอนกรีตโครงสร้างได้มากที่สุด

งานวิจัยนี้เลือกทดสอบกับชุดตัวอย่าง 5 ชุดที่มีกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 72 ชั่วโมงต่อชุด พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดที่สูง จะมีการสึกกร่อนที่ต่ำกว่า ตัวอย่างส่วนผสมที่ 3 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.50 การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้หินปูนย่อยเป็นส่วนผสม มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการสึกกร่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1.00 มิลลิเมตร รองลงมาคือส่วนผสมที่ 2 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.55 การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้หินปูนย่อยเป็นส่วนผสม มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 241 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การสึกกร่อนเท่ากับ

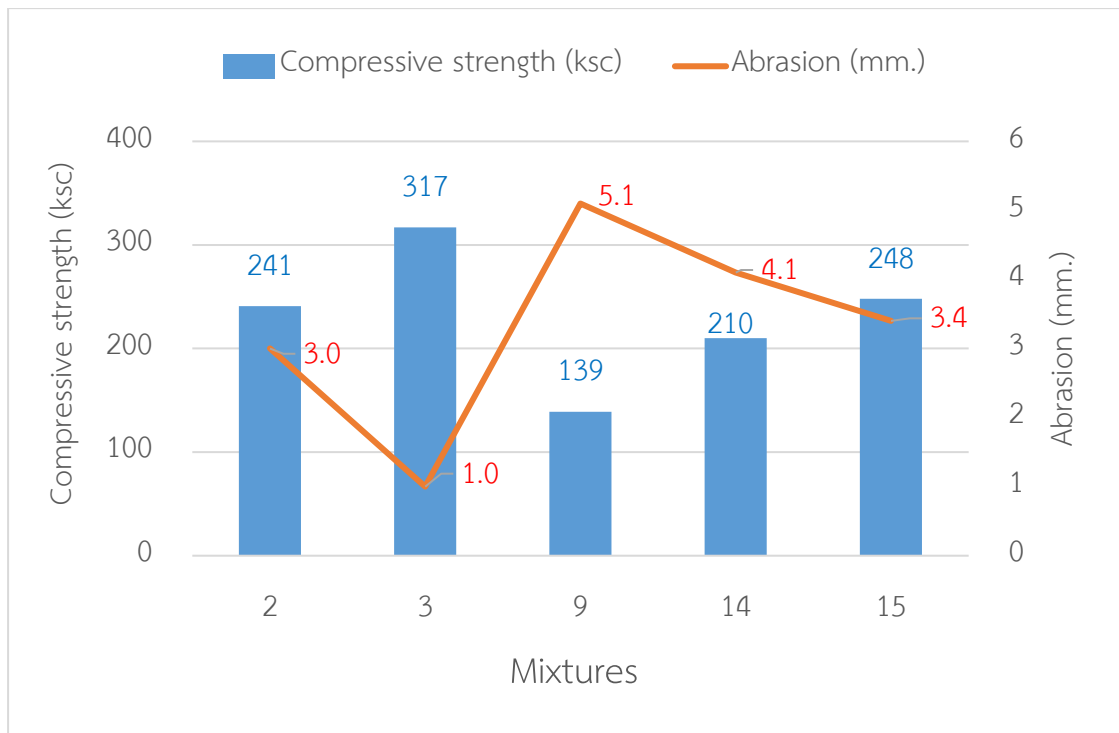
3.00 มิลลิเมตร ในส่วนของส่วนผสมควบคุม(ส่วนผสมที่ 14 และ 15) อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.55 และ 0.50 การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ใช้หินปูนย่อยเป็นส่วนผสม มีค่าการสึกกร่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.10 และ 3.40 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในส่วนผสมที่ 9 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.60 การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 ซึ่งใช้หินบะซอลต์เป็นส่วนผสม มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 139 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการสึกกร่อนเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 5.10 มิลลิเมตร

ซึ่งเมื่อพิจารณาการสึกกร่อนกับกำลังรับแรงอัดแล้ว พบว่าส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดสูงจะมีค่าการสึกกร่อนที่ต่ำ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการสึกกร่อนสูงนั่นเอง ทั้งนี้ในส่วนผสมที่มีค่าอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.50 จะส่งผลต่อการสึกกร่อนที่น้อยกว่าอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.55 และ 0.60 ตามลำดับเช่นเดียวกัน ดังแสดงตามตารางที่ 13 และภาพที่ 13

ตารางที่ 14 ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

No.	Mixtures	Abrasion (mm.)	Compressive strength (ksc)
2	L0.55W5.0	3.0	241
3	L0.50W5.0	1.0	317
9	B0.60W5.0	5.1	139
14	L0.55W0.0(Control 0.55)	4.1	210
15	L0.50W0.0(Control 0.50)	3.4	248

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 13 ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์จากการศึกษาครั้งนี้และแนวทางการพัฒนางานวิจัยจีโอโพลีเมอร์จากเถาขานอ้อย เพื่อพัฒนาจีโอโพลีเมอร์ในงานคอนกรีตในด้านวัสดุก่อสร้าง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถาขานอ้อยที่ใช้ตะกอนน้ำประปาเผาแทนที่ และใช้มวลรวมหยาบที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ หินปูนย่อยและหินบะซอลต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 พบว่าการใช้ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5-7.5 มีแนวโน้มช่วยให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับจีโอโพลีเมอร์จากเถาขานอ้อยเพียงอย่างเดียวมีกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 12 – 35 เลยทีเดียว

5.1.2 อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด การเพิ่มอัตราส่วน AL/B ช่วยให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตดีขึ้น แต่ทำให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง

5.1.3 จีโอโพลีเมอร์ที่ใช้มวลรวมที่เป็นหินปูนย่อยมีกำลังอัดที่ดีกว่าหินบะซอลต์ หรือมวลรวมที่มีความพรุนและอัตราดูดซึมน้ำต่ำ มีแนวโน้มทำให้จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตแข็งแรงกว่ามวลรวมที่มีความพรุนและอัตราการดูดน้ำสูง

5.1.4 ตะกอนน้ำประปาเผาอาจเป็นวัสดุตั้งต้นที่ไม่ช่วยทำให้การป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตดีขึ้น โดยเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ไม่เติมตะกอนน้ำประปาเผาซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตต่ำกว่า

5.1.5 การสีกร้อนของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัด ตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดที่สูงจะมีความต้านทานต่อการสีกร้อนสูงเช่นเดียวกัน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาวิธีการทำให้จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่สามารถแข็งตัวได้เองโดยไม่ต้องอาศัยความร้อน

5.2.2 พัฒนาจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถาขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา ในการพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างแทนคอนกรีตทั่วไป

บรรณานุกรม



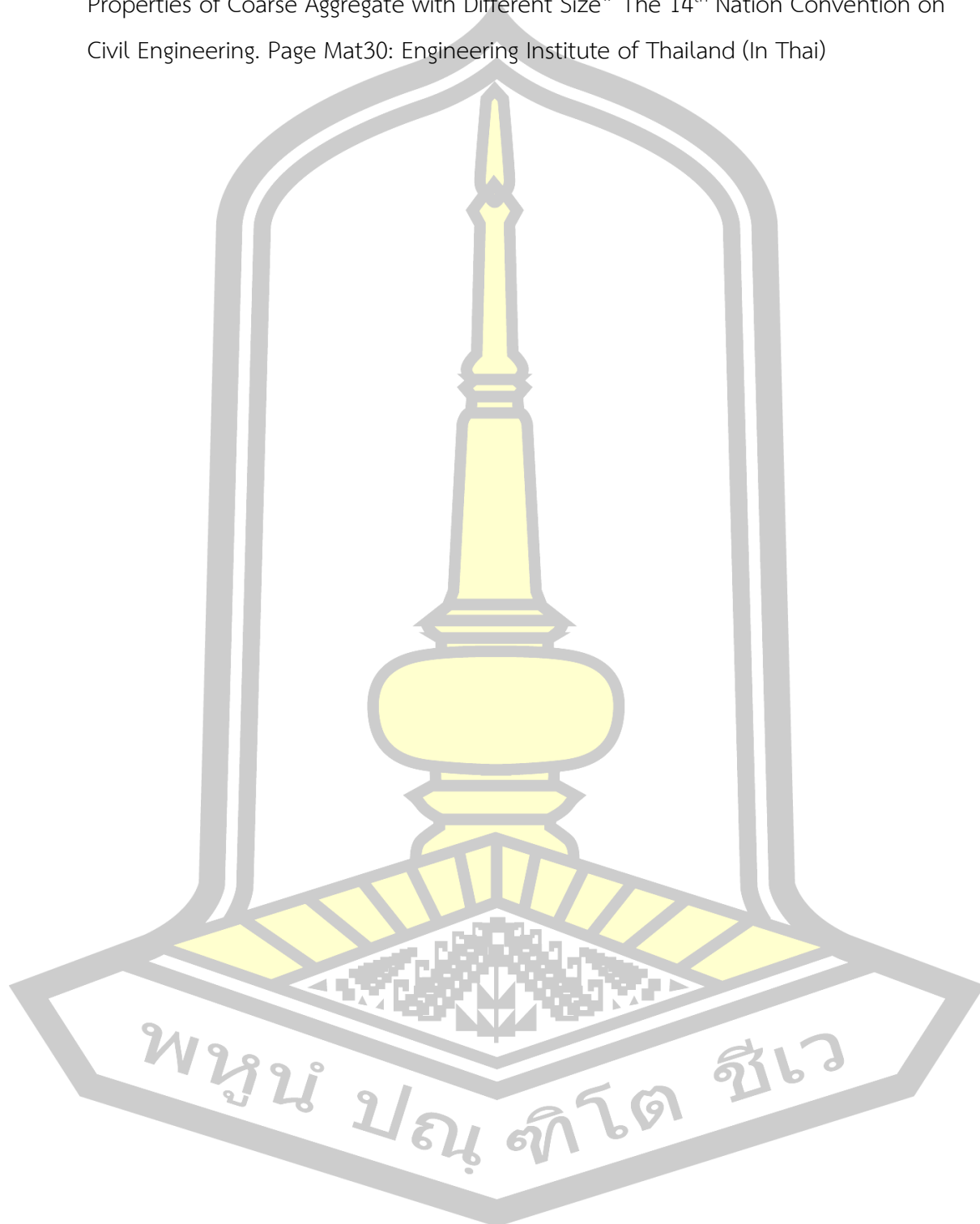
## บรรณานุกรม

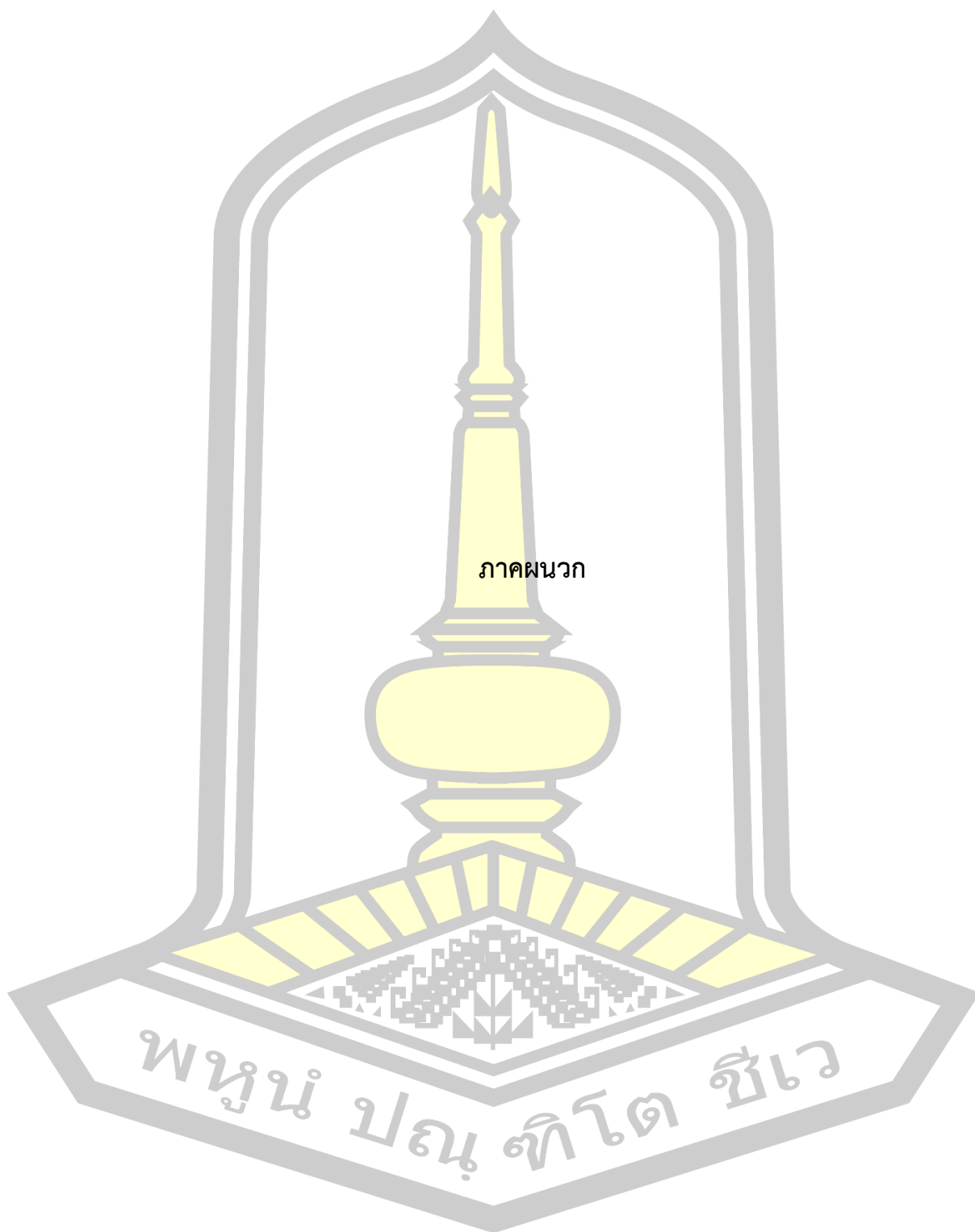
- [1] The Office of Industrial Economics Retrieved from <http://www.oie.go.th>
- [2] Somrerng Rukzon and Nirod Ngermpom(2010) The development of rice husk ash and bagasse ash based geopolymeric materials. Bangkok : National Research Council Of Thailand. (In Thai)
- [3] Abdulkadir Çevika, Radhwan Alzeebareea, GhassanHumura, Anil Niş, Mehmet ErenGülşan, Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolymer concrete, *Ceramics International*. 44 (2018) 12253-12264.
- [4] Rukzon S. Use of Rice Husk-Bark Ash by Grinding to Finesse in Khon Kaen University Engineering Journal.2005;32(3):423-440 (In Thai)
- [5] Sata V. The Use of Local Pozzolan in Fiber Reinforced Concrete Khon Kaen University Engineering Journal.2010;38(1):29-37(In Thai)
- [6] Guilherme Chagas Cordeiro, Priscila Vinco Andreao and Luís Marcelo Tavares. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. *Heliyon* October 1, 2019
- [7] A. Rajasekar K. and et al. Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*. Vol.171 20 May 2018, Pages 350-356
- [8] A. Duangchan,“ Development of Bagasse Ash Concrete Block for Construction” . M.S. Thesis, Dept. Civil Engineering, Kasetsart University, Thailand, 2006 (In Thai)
- [9] Kiatsuda Somna “Cementitious Material from Calcium Car Residue and Water Supply Sludge” *Thailand Concrete Association Journal* N0.28 August 2016 (In Thai)
- [10] Athika Wongkvanklom (2010) “A Study of Geopolymer Mortar from Bagasse Ash and Water Supply Sludge” Master Degree of Engineering Mahasarakham University. (In Thai)



- [11] Worayot Witoteerasan(2013) “A Study of Geopolymer Mortar from Bagasse Ash and Calcined Water Supply Sludge” Master Degree of Engineering Mahasarakham University. (In Thai)
- [12] Kitsada Numnol (1997) “Using sludge from the water supply system to replace clay in the production of clay bricks” Mahanakorn University of Technology. (In Thai)
- [13] Prinya Chindaprasirt and Thanudkij Chareerat(2548) “Geopolymer from Mae Moh fly Ash” Sustainable Infrastructure Research and Development Center,Khon Kaen University. (In Thai)
- [14] Thiensak Klabprasit and et al. :Research and Development Journal Volume 19 No.2, 2008 “Fly Ash and Bio-mass Ash Based Geopolymer Pastes Part I: Effect of Mix Proportion on Compressive Strength” (In Thai)
- [15] Kong Daniel, L.Y., Sanjayan Jay, G., &KwesiSagoe-Crentsil. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. Cement and Concrete Research, 37(12), 1583–1589.
- [16] Abrams, D.A., “Design of Concrete Mixtures Bulletin 1”, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 1918, 20 pp.
- [17] Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. Applied Clay Science, 43(2), 218–223
- [18] El-Alfi, E.A., A.M. Radwan, and M.H. Ali. 2004. Physicomechanical properties of basalt bricks. International Ceramic Review 53(3): 178–181.
- [19] Danupon Tonnayopas, Waranrat Kaewsomboon and Suchart Chantaramanee (2010) “Characterization of Ceramic Tile Fabricated from Basalt Quarry Dust Incorporated with Oil Palm Fiber Ash” Thaksin.J., Vol.12 (3) October 2009 - January 2010 (In Thai)
- [20] Prachoom Khamput and et al. (2015) “The Use of Volcanic Rock Waste in Paving Block Products”: Journal of Community Development and Life Quality Chai Mai University Vol3 No.3(2015) Setember-December 2015(In Thai)

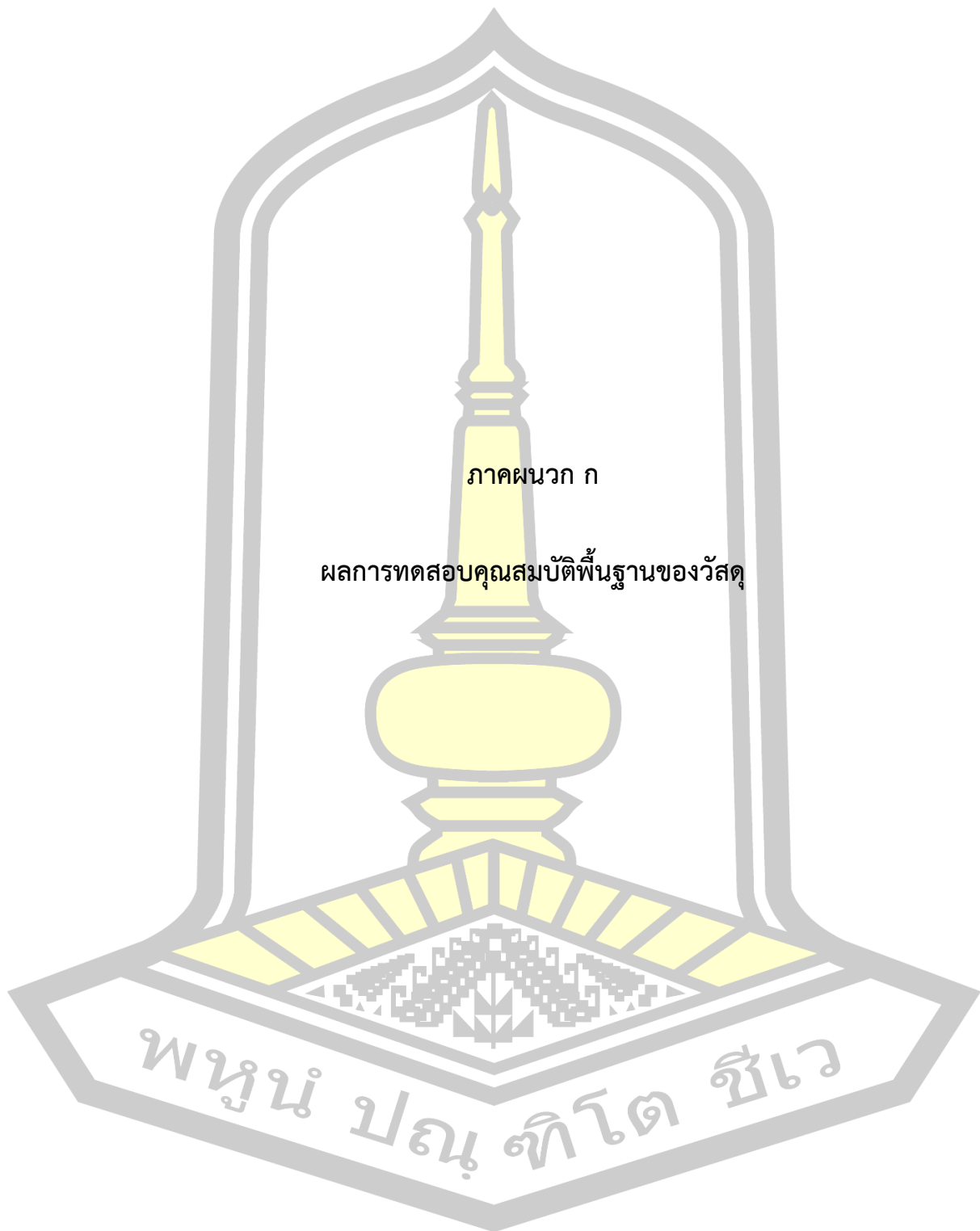
[21] Putthipong Haleerattanawattana and Akasit Limsuwan “Physical and Mechanical Properties of Coarse Aggregate with Different Size” The 14<sup>th</sup> Nation Convention on Civil Engineering. Page Mat30: Engineering Institute of Thailand (In Thai)





ภาคผนวก

พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว



ตารางภาคผนวก ก.1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะถ้ำชานอ้อย

รายการ	ผลทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	49.5
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ซม.)	-1
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ซม.)	20.1
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง (ลบ.ซม.)	21.1
ความถ่วงจำเพาะ	2.34

ตารางภาคผนวก ก.2 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตะกอนน้ำประปาเผา

รายการ	ผลทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	47.7
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ซม.)	0.9
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ซม.)	20.8
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง (ลบ.ซม.)	19.9
ความถ่วงจำเพาะ	2.40

ตารางภาคผนวก ก.3 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด

รายการ	ครั้งที่ทดลอง		เฉลี่ย
	1	2	
น้ำหนัก Flask (กรัม)	159.51	159.51	-
น้ำหนัก Flask (กรัม) + น.น. น้ำ (กรัม)	655.44	655.4	-
น.น. ทรายอิมตัวผิวแห้ง (กรัม)	500	500	-
น.น. Flask (กรัม) + น.น. ทรายอิมตัวผิวแห้ง (กรัม) + น.น. น้ำ (กรัม)	963.76	962.46	-

ตารางภาคผนวก ก.3 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (ต่อ)

รายการ	ครั้งที่ทดลอง		เฉลี่ย
	1	2	
น.น. ทรายอบแห้ง (กรัม)	496.19	495.26	-
ความถ่วงจำเพาะรวม (Oven-Dry)	2.59	2.57	2.58
ความถ่วงจำเพาะรวม (SSD)	2.61	2.59	2.60
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.64	2.63	2.64
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	0.77	0.96	0.86

ตารางภาคผนวก ก.4 ผลการทดสอบหาค่าการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของทราย

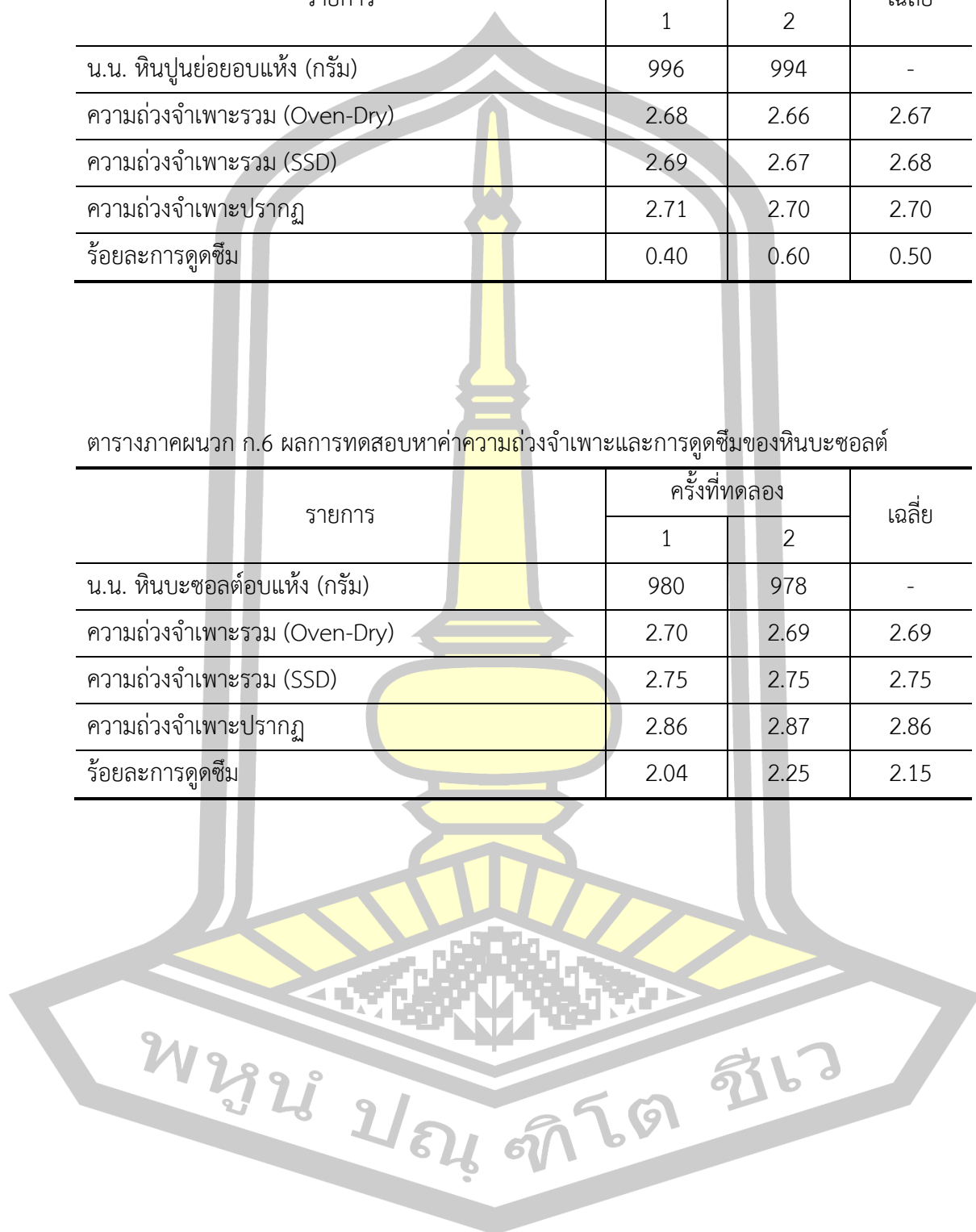
ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องเปิดของตะแกรง (มม.)	น.น. ตะแกรง (กรัม)	น.น. ตะแกรง + น.น. ทราย (กรัม)	น.น. ทราย (กรัม)	ร้อยละ ทรายค้ำตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้ำตะแกรงสะสม	ร้อยละ ทรายผ่านตะแกรง
4	4.75	510	516	6	1.2	1.2	99
8	2.36	460	529	69	13.8	15	85
16	1.18	429	519	90	18	33	67
30	0.60	415	518	103	20.6	53.6	46
50	0.30	385	486	101	20.2	73.8	26
100	0.15	370	487	117	23.4	97.2	3
ถัด	-	-	-	14	2.8	100	0
รวม				500	100	273.8	
โมดูลัสความละเอียด (F.M.)						2.73	

ตารางภาคผนวก ก.5 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินปูนย่อย

รายการ	ครั้งที่ทดลอง		เฉลี่ย
	1	2	
น.น. หินปูนย่อยอบแห้ง (กรัม)	996	994	-
ความถ่วงจำเพาะรวม (Oven-Dry)	2.68	2.66	2.67
ความถ่วงจำเพาะรวม (SSD)	2.69	2.67	2.68
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.71	2.70	2.70
ร้อยละการดูดซึม	0.40	0.60	0.50

ตารางภาคผนวก ก.6 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของหินบะซอลต์

รายการ	ครั้งที่ทดลอง		เฉลี่ย
	1	2	
น.น. หินบะซอลต์อบแห้ง (กรัม)	980	978	-
ความถ่วงจำเพาะรวม (Oven-Dry)	2.70	2.69	2.69
ความถ่วงจำเพาะรวม (SSD)	2.75	2.75	2.75
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.86	2.87	2.86
ร้อยละการดูดซึม	2.04	2.25	2.15







ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

พหุพันธ์ ปณ ทิโต ชีเว

ตารางภาคผนวก ข.1 ขนาดและน้ำหนักของก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม ที่	CODE	ก้อนที่	อายุ 3 วัน		อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)	ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)	ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)
1	L0.60W5.0	1	99.1x100.1x100.05	2,374	100x100x99	2,382	100x105x99	2,386
		2	100x100.15x100.1	2,396	100x100x99.5	2,408	100x100x100	2,386
		3	100.05x99.5x100.15	2,422	99x99.5x99.8	2,383	100x105x101	2,405
2	L0.55W5.0	1	99x100x99.5	2,416	100x99.5x100	2,366	99x100x100	2,406
		2	99x99.8x99.5	2,380	100.1x99.5x99.5	2,382	99x99x99	2,365
		3	99.70x99x99	2,365	99.5x99.5x99.5	2,366	100x99x100	2,363
3	L0.50W5.0	1	100.05x100x99	2,400	99x100x99.6	2,374	100x99x99	2,404
		2	100x99.50x99	2,376	99.6x99.6x99.3	2,393	100x99x100	2,412
		3	99x99.4x99.8	2,411	100.03x99.3x100	2,404	100x99x99	2,371
4	L0.60W7.5	1	100x99x100.1	2,393	100.5x100x100	2,405	100x100x99	2,375
		2	99x99x99	2,391	100.1x99.09x100	2,394	99x99x100.1	2,382
		3	100x100x100.5	2,412	100.05x100x100	2,356	99x99x100	2,392
5	L0.55W7.5	1	100x100x100.05	2,368	100x99.9x100	2,360	100x100x100.1	2,376
		2	99x99x99.5	2,425	100.1x100x100	2,391	100.1x100.05x99	2,397
		3	100x99x99	2,446	100x100x99.95	2,394	99x99x100	2,389

ตารางภาคผนวก ข.1 ขนาดและน้ำหนักของก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต (ต่อ)

ส่วนผสม ที่	CODE	ก้อนที่	อายุ 3 วัน		อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			ขนาด กวxยxส(mm.)	น้ำหนัก (ก.)	ขนาด กวxยxส(mm.)	น้ำหนัก (ก.)	ขนาด กวxยxส(mm.)	น้ำหนัก (ก.)
6	L0.50W7.5	1	100x100x101	2,406	101x99x100	2,396	100x99x99	2,367
		2	100x101x101	2,395	101x100x99	2,394	99x99x100.05	2,399
		3	101x101x105	2,388	101x100x99	2,385	100x100x100.05	2,461
7	B0.70W5.0	1	100.1x100x100	2,394	99.8x99.5x99	2,399	95x101x101	2,380
		2	100.05x100x100	2,410	99.7x100x99	2,404	101x101x100	2,420
		3	100.1x100x100.05	2,415	99x99.5x99	2,404	100x101x100	2,398
8	B0.65W5.0	1	100x99x100.1	2,124	100x99x99	2,421	100x100x99	2,419
		2	99.6x100x100.05	2,395	99x100x100	2,437	100x99x99	2,401
		3	99.6x99.3x100.1	2,411	100x99x99	2,395	100x100x105	2,403
9	B0.60W5.0	1	99.3x99.6x100.1	2,422	100x100.2x100.1	2,416	99x99x99	2,403
		2	100.05x99.6x99.6	2,422	99x100x100.1	2,415	100x100x99	2,415
		3	100x99x99	2,375	99x99x100	2,464	100x99x100	2,422
10	B0.70W7.5	1	100x99x99	2,400	101x99x100	2,392	100x99x100.1	2,390
		2	99x100x100	2,393	101x99x101	2,383	100x100x99	2,388
		3	99x100x99	2,349	101x100x101	2,396	100x99x100	2,361

ตารางภาคผนวก ข.1 ขนาดและน้ำหนักของก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต (ต่อ)

ส่วนผสม ที่	CODE	ก้อนที่	อายุ 3 วัน		อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)	ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)	ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)
11	B0.65W7.5	1	100x99x100	2,424	100x99x101	2,431	100x100x99	2,437
		2	99x99x100	2,434	100x99x99	2,435	99x100.1x99	2,444
		3	100x100x99	2,422	100x99x99	2,431	100x100x99	2,402
12	B0.60W7.5	1	100x99x100	2,433	100x99x99	2,435	100x100x99	2,381
		2	100x100x101	2,427	99x99x99	2,399	100x100x100.1	2,388
		3	100x99x100	2,474	101x99x100	2,427	99x99x100	2,432
13	L0.60W0.0	1	100.02x99.05x100.1	2,392	100.5x100x100	2,405	100x100x99	2,375
		2	99.5x99.1x99.3	2,392	100.1x99.09x100	2,394	99x99x100.1	2,382
		3	99x99.5x100	2,411	100.05x100x100	2,356	99x99x100	2,392
14	L0.55W0.0	1	99x99x100.05	2,368	100x99.9x100	2,360	100x100x100.1	2,376
		2	99x99x99.5	2,420	100.1x100x100	2,391	100.1x100.05x99	2,397
		3	100x99x99	2,443	100x100x99.95	2,394	99x99x100	2,389
15	L0.50W0.0	1	99x99x100	2,402	101x99x100	2,396	100x99x99	2,367
		2	99x99x99	2,397	101x100x99	2,394	99x99x100.05	2,399
		3	99x99x99	2,381	101x100x99	2,385	100x100x100.05	2,461

ตารางภาคผนวก ข.1 ขนาดและน้ำหนักของก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ต่อ)

ส่วนผสม ที่	CODE	ก้อนที่	อายุ 3 วัน		น้ำหนัก (g.)	อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)		ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)	ขนาด กxยxส(mm.)	น้ำหนัก (g.)
16	B0.70W0.0	1	100x100x100	2,400	99.8x99.5x99	2,399	95x101x101	2,380	
		2	99x99.5x99.5	2,404	99.7x100x99	2,404	101x101x100	2,420	
		3	100x100x100	2,417	99x99.5x99	2,404	100x101x100	2,398	
17	B0.65W0.0	1	100x99x100.1	2,128	100x99x99	2,421	100x100x99	2,419	
		2	99.6x100x100.05	2,396	99x100x100	2,437	100x99x99	2,401	
		3	99.5x99.1x100.1	2,413	100x99x99	2,395	100x100x105	2,403	
18	B0.60W0.0	1	99.5x99x100	2,422	100x100.2x100.1	2,416	99x99x99	2,403	
		2	100x99x99	2,422	99x100x100.1	2,415	100x100x99	2,415	
		3	99x100x100.05	2,375	99x99x100	2,464	100x99x100	2,422	

ตารางภาคผนวก ข.2 ค่าการบดตัวของซีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสมที่	CODE	ชนิดของหิน	ร้อยละการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปา	NS/NH	AL/B	ค่าการบดตัว(mm.)
1	L0.60W5.0	limestone	5	1	0.60	55
2	L0.55W5.0	limestone	5	1	0.55	15
3	L0.50W5.0	limestone	5	1	0.50	5
4	L0.60W7.5	limestone	7.5	1	0.60	68
5	L0.55W7.5	limestone	7.5	1	0.55	33
6	L0.50W7.5	limestone	7.5	1	0.50	10
7	B0.70W5.0	Basalt	5	1	0.70	65
8	B0.65W5.0	Basalt	5	1	0.65	20
9	B0.60W5.0	Basalt	5	1	0.60	15
10	B0.70W7.5	Basalt	7.5	1	0.70	135
11	B0.65W7.5	Basalt	7.5	1	0.65	53
12	B0.60W7.5	Basalt	7.5	1	0.60	38
13	L0.60W0.0	limestone	0	1	0.60	38
14	L0.55W0.0	limestone	0	1	0.55	26
15	L0.50W0.0	limestone	0	1	0.50	15
16	B0.70W0.0	Basalt	0	1	0.70	34
17	B0.65W0.0	Basalt	0	1	0.65	22
18	B0.60W0.0	Basalt	0	1	0.60	10

ตารางภาคผนวก ข.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของซีโอพีเคลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสมที่	CODE	ก้อนตัวอย่างที่	อายุ 3 วัน		อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)
1	L0.60W5.0	1	199.44		181.89		197.38	
		2	133.50	170.01	182.37	186.57	213.12	208.04
		3	177.09		195.45		213.62	
2	L0.55W5.0	1	212.98		205.06		239.88	
		2	229.99	214.95	222.76	220.25	253.45	240.62
		3	201.88		232.94		228.52	
3	L0.50W5.0	1	283.55		294.31		321.56	
		2	273.19	282.65	289.35	290.40	314.40	316.79
		3	291.21		287.54		314.40	
4	L0.60W7.5	1	167.17		175.22		187.16	
		2	181.21	173.44	184.11	178.60	184.53	184.61
		3	171.94		176.47		182.14	
5	L0.55W7.5	1	225.49		229.76		261.39	
		2	233.72	223.83	225.82	230.50	257.34	254.00
		3	212.27		235.92		243.28	

ตารางภาคผนวก ข.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของซีโอพีเคมีเออร์คอนกรีต (ต่อ)

ส่วนผสมที่	CODE	ก้อนตัวอย่างที่	อายุ 3 วัน		อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)
6	L0.50W7.5	1	263.81	276.03	268.15	268.15	299.81	
		2	213.96	244.23	328.47	270.97	328.47	299.81
		3	254.93	268.22	302.81	268.22	302.81	299.81
7	B0.70W5.0	1	49.60	57.01	93.99	93.99	93.99	
		2	52.98	49.60	93.38	57.26	93.38	93.62
		3	46.22	54.79	93.49	54.79	93.49	93.62
8	B0.65W5.0	1	76.02	81.01	100.63	100.63	98.77	
		2	66.88	73.05	89.74	79.17	89.74	98.77
		3	76.26	81.92	105.94	81.92	105.94	98.77
9	B0.60W5.0	1	111.56	126.85	139.19	139.19	139.02	
		2	109.09	110.32	139.68	111.47	139.68	139.02
		3	110.31	86.62	138.19	86.62	138.19	139.02
10	B0.70W7.5	1	52.57	59.23	66.14	66.14	64.66	
		2	51.09	51.25	63.68	61.04	63.68	64.66
		3	50.09	59.97	64.16	59.97	64.16	64.66



ตารางภาคผนวก ข.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของซีโอทีเดิมอร์คอนกรีต (ต่อ)

ส่วนผสมที่	CODE	ก้อนตัวอย่างที่	อายุ 3 วัน		อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)
11	B0.65W7.5	1	78.38		79.34		97.95	
		2	85.57	79.83	82.30	82.61	98.44	97.21
		3	75.55		86.18		95.24	
12	B0.60W7.5	1	102.77		109.95		134.51	
		2	96.89	107.53	118.95	111.90	118.31	125.02
		3	122.94		106.80		122.24	
13	L0.60W0.0	1	112.99		145.30		171.69	
		2	122.48	117.23	152.66	148.10	169.27	169.35
		3	116.22		146.34		167.09	
14	L0.55W0.0	1	183.69		182.62		216.29	
		2	190.39	182.33	179.49	183.21	212.94	210.18
		3	172.91		187.52		201.31	
15	L0.50W0.0	1	215.22		248.52		221.71	
		2	174.55	199.25	241.88	243.96	271.58	247.88
		3	207.98		241.49		250.36	

ตารางภาคผนวก ข.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของซีโอพีเดิมอร์คอนกรีต (ต่อ)

ส่วนผสมที่	CODE	ก้อนตัวอย่างที่	อายุ 3 วัน		อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
			กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc)
16	B0.70W0.0	1	42.17		51.89		58.67	
		2	45.04	42.17	54.58	52.11	58.29	58.44
		3	39.30		49.86		58.36	
17	B0.65W0.0	1	70.76		71.79		87.87	
		2	62.25	68.00	66.09	70.16	78.37	86.25
		3	70.99		72.60		92.51	
18	B0.60W0.0	1	77.07		100.02		101.88	
		2	75.36	76.21	95.35	87.89	102.24	101.76
		3	76.20		68.30		101.16	

ตารางภาคผนวก ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 2 : L:0.55W:5.0

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
1	1800	2.40	2.45E-09	120	1.40	2.14E-08	120	12.00	1.84E-07
2	1800	1.20	1.23E-09	120	1.10	1.69E-08	120	10.00	1.53E-07
3	6000	2.70	8.27E-10	120	1.00	1.53E-08	120	10.00	1.53E-07
4	1200	0.30	4.6E-10	120	1.10	1.69E-08	120	10.00	1.53E-07
5	1800	0.40	4.09E-10	120	1.10	1.69E-08	120	10.50	1.61E-07
6	1800	0.30	3.06E-10	120	0.90	1.38E-08	120	9.80	1.5E-07
7	1800	0.20	2.04E-10	120	1.00	1.53E-08	120	9.40	1.44E-07
8	1800	0.60	6.13E-10	120	0.90	1.38E-08	120	9.30	1.42E-07
9	5400	1.30	4.43E-10	120	0.80	1.23E-08	120	9.50	1.46E-07
10	12600	2.60	3.79E-10	120	0.80	1.23E-08	120	9.40	1.44E-07
11	46800	8.40	3.3E-10	120	0.90	1.38E-08	120	10.60	1.62E-07
12	7200	1.30	3.32E-10	120	0.80	1.23E-08	120	10.00	1.53E-07
13	3600	0.90	4.6E-10	120	0.80	1.23E-08	120	9.00	1.38E-07
14	3600	0.90	4.6E-10	120	0.80	1.23E-08	120	8.00	1.23E-07

ตารางภาคผนวก ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 2 : L0.55W5.0 (ต่อ)

No.	ก่อนตัวอย่างที่ 1			ก่อนตัวอย่างที่ 2			ก่อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
15	3600	1.10	5.62E-10	120	0.80	1.23E-08	120	7.90	1.21E-07
16	1800	0.60	6.13E-10	120	0.70	1.07E-08	120	7.80	1.2E-07
17	1800	0.40	4.09E-10	120	0.70	1.07E-08	120	7.70	1.18E-07
18	1800	0.30	3.06E-10	120	0.70	1.07E-08			
19	3600	0.40	2.04E-10	120	0.70	1.07E-08			
20	1800	0.20	2.04E-10	120	0.70	1.07E-08			
21	1800	0.70	7.15E-10	120	0.70	1.07E-08			
22	1800	0.60	6.13E-10	120	0.60	9.19E-09			
23	1800	0.30	3.06E-10						
24	90000	13.70	2.8E-10						
25	1800	0.30	3.06E-10						
26	1800	0.30	3.06E-10						
27	1800	0.30	3.06E-10						
28	1800	0.30	3.06E-10						

ตารางภาคผนวก ข.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 3 : L0.50W5.0

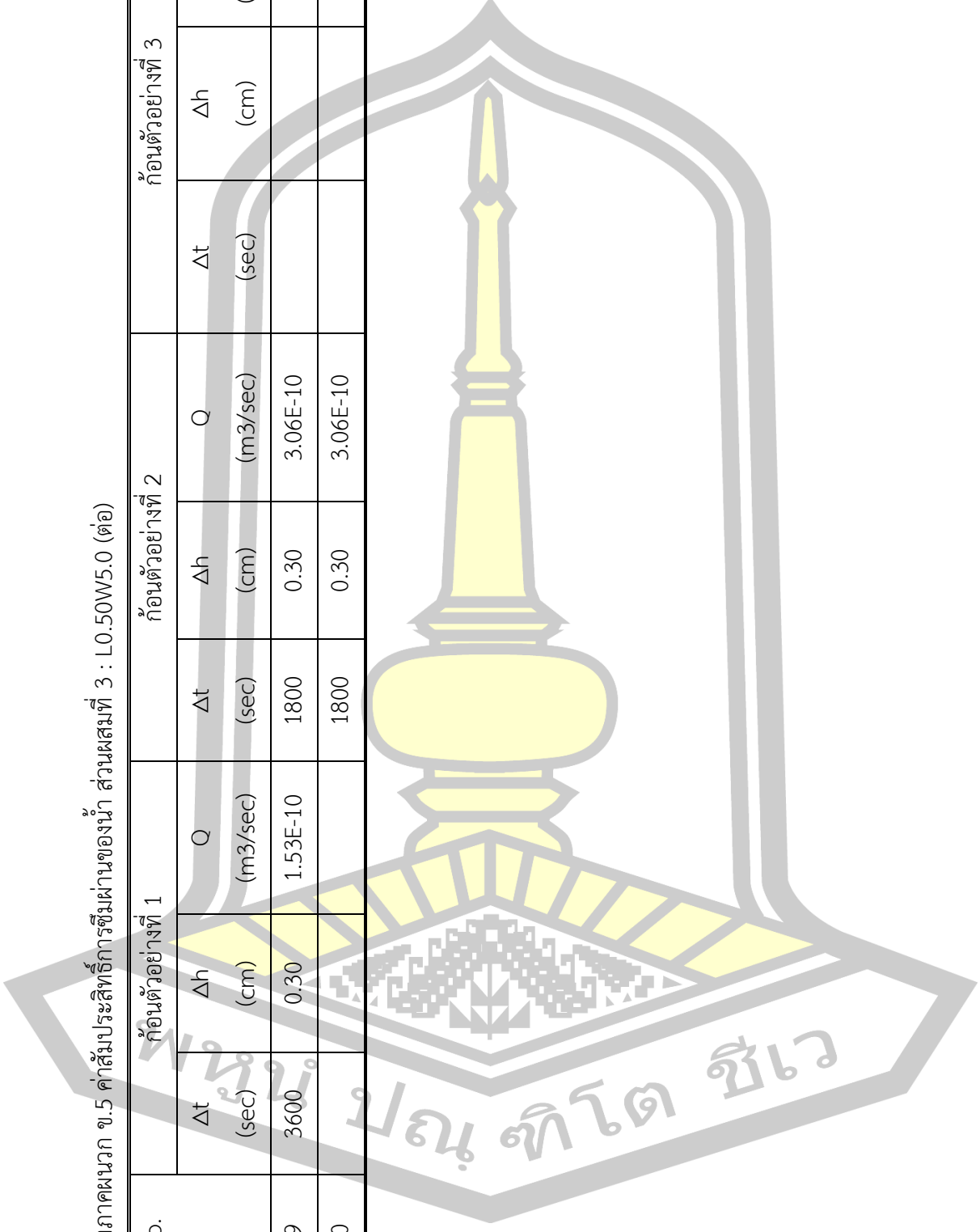
No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
1	1800	0.50	5.11E-10	1800	0.70	7.15E-10	600	2.90	8.89E-09
2	1800	0.40	4.09E-10	1800	0.50	5.11E-10	600	2.50	7.66E-09
3	1800	0.40	4.09E-10	1800	0.50	5.11E-10	600	2.20	6.74E-09
4	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.50	5.11E-10	600	2.40	7.35E-09
5	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.40	4.09E-10	600	2.40	7.35E-09
6	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.40	4.09E-10	600	2.50	7.66E-09
7	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.40	4.09E-10	600	2.30	7.05E-09
8	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.30	3.06E-10	600	2.50	7.66E-09
9	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.20	2.04E-10	600	2.50	7.66E-09
10	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.20	2.04E-10	600	2.40	7.35E-09
11	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.20	2.04E-10	600	2.50	7.66E-09
12	1800	0.30	3.06E-10	49200	6.10	2.28E-10	600	2.50	7.66E-09
13	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.30	3.06E-10	600	2.60	7.97E-09
14	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.40	4.09E-10	600	2.50	7.66E-09

ตารางภาคผนวก ข.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 3 : L0.50W5.0 (ต่อ)

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
15	3600	0.40	2.04E-10	1800	0.40	4.09E-10	600	2.60	7.97E-09
16	1800	0.20	2.04E-10	1800	0.30	3.06E-10	600	2.70	8.27E-09
17	3600	0.30	1.53E-10	1800	0.30	3.06E-10	600	2.60	7.97E-09
18	3600	0.30	1.53E-10	1800	0.30	3.06E-10	600	2.50	7.66E-09
19	61200	6.60	1.98E-10	1800	0.30	3.06E-10			
20	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.20	2.04E-10			
21	1800	0.30	3.06E-10	69000	8.80	2.34E-10			
22	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.30	3.06E-10			
23	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.20	2.04E-10			
24	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.25	2.55E-10			
25	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.40	4.09E-10			
26	3600	0.50	2.55E-10	1800	0.35	3.57E-10			
27	3600	0.40	2.04E-10	1800	0.30	3.06E-10			
28	3600	0.30	1.53E-10	1800	0.30	3.06E-10			

ตารางภาคผนวก ข.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 3 : L0.50W5.0 (ต่อ)

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1		ก้อนตัวอย่างที่ 2		ก้อนตัวอย่างที่ 3				
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
29	3600	0.30	1.53E-10	1800	0.30	3.06E-10			
30				1800	0.30	3.06E-10			



ตารางภาคผนวก ข.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 9 : B0.60W5.0

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
1	1800	1.90	1.94E-09	1800	5.70	5.82E-09	900	11.60	2.37E-08
2	1800	1.00	1.02E-09	1800	2.90	2.96E-09	900	10.90	2.23E-08
3	1800	0.90	9.19E-10	1800	2.20	2.25E-09	900	10.20	2.08E-08
4	1800	0.50	5.11E-10	1800	1.40	1.43E-09	900	9.90	2.02E-08
5	1800	1.00	1.02E-09	1800	1.80	1.84E-09	900	11.10	2.27E-08
6	1800	1.70	1.74E-09	1800	4.30	4.39E-09	900	10.30	2.1E-08
7	1800	0.30	3.06E-10	1800	3.00	3.06E-09	900	9.80	2E-08
8	1800	2.40	2.45E-09	1800	3.50	3.57E-09	900	9.60	1.96E-08
9	1800	1.60	1.63E-09	1800	3.60	3.68E-09	900	11.10	2.27E-08
10	1800	1.50	1.53E-09	1800	3.40	3.47E-09	900	10.10	2.06E-08
11	1800	3.00	3.06E-09	1800	7.20	7.35E-09	900	9.70	1.98E-08
12	1800	3.20	3.27E-09	3600	5.20	2.66E-09	900	9.20	1.88E-08
13	3600	4.90	2.5E-09	3600	2.00	1.02E-09	1200	10.70	1.64E-08
14	3600	2.60	1.33E-09	3600	4.00	2.04E-09	1200	9.90	1.52E-08



ตารางภาคผนวก ข.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 9 : B0.60W5.0 (ต่อ)

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
15	3600	2.40	1.23E-09	3600	5.10	2.6E-09	1200	9.30	1.42E-08
16	3600	2.10	1.07E-09	3600	4.80	2.45E-09	1200	8.80	1.35E-08
17	3600	1.60	8.17E-10	3600	5.40	2.76E-09			
18	3600	1.60	8.17E-10	3600	5.60	2.86E-09			
19	3600	1.40	7.15E-10	4800	7.90	3.03E-09			
20	4800	1.80	6.89E-10						
21	6000	2.50	7.66E-10						
22	3600	1.10	5.62E-10						

ตารางภาคผนวก ข.7 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 14 : L.0.55W.0 (Control.0.55)

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
1	1800	4.00	4.09E-09	1800	2.40	2.45E-09	300	2.60	1.59E-08
2	1800	3.60	3.68E-09	1800	1.90	1.94E-09	300	2.40	1.47E-08
3	1800	3.50	3.57E-09	1800	1.80	1.84E-09	300	2.40	1.47E-08
4	1800	2.30	2.35E-09	1800	1.20	1.23E-09	300	2.50	1.53E-08
5	1800	2.80	2.86E-09	1800	1.50	1.53E-09	300	2.40	1.47E-08
6	1800	2.40	2.45E-09	1800	1.20	1.23E-09	300	2.50	1.53E-08
7	1800	2.50	2.55E-09	1800	1.30	1.33E-09	300	2.70	1.65E-08
8	1800	2.70	2.76E-09	1800	1.50	1.53E-09	300	2.00	1.23E-08
9	1800	2.40	2.45E-09	1800	1.30	1.33E-09	300	2.60	1.59E-08
10	1800	2.40	2.45E-09	1800	1.20	1.23E-09	300	2.40	1.47E-08
11	1800	2.10	2.14E-09	1800	1.10	1.12E-09	300	2.40	1.47E-08
12	1800	2.20	2.25E-09	1800	1.10	1.12E-09	300	2.50	1.53E-08
13	1800	1.80	1.84E-09	142200	1.00	1.29E-11	300	2.40	1.47E-08
14	1800	1.20	1.23E-09	1800	2.70	2.76E-09	300	2.50	1.53E-08

ตารางภาคผนวก ข.7 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 14 : L.0.55W.0 (Control.0.55) (ต่อ)

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
15	1800	0.90	9.19E-10	1800	1.50	1.53E-09	300	2.40	1.47E-08
16	1800	0.80	8.17E-10	1800	1.30	1.33E-09	300	2.40	1.47E-08
17	1800	0.70	7.15E-10	1800	1.00	1.02E-09	300	2.40	1.47E-08
18	1800	0.70	7.15E-10	1800	1.10	1.12E-09	300	2.50	1.53E-08
19	1800	0.60	6.13E-10	1800	1.00	1.02E-09			
20	1800	0.50	5.11E-10	1800	0.80	8.17E-10			
21	1800	0.50	5.11E-10	1800	0.90	9.19E-10			
22	1800	0.50	5.11E-10	1800	0.80	8.17E-10			
23	1800	0.50	5.11E-10	1800	0.80	8.17E-10			
24	1800	0.50	5.11E-10	1800	0.80	8.17E-10			
25	1800	0.30	3.06E-10	1800	0.70	7.15E-10			
26	1800	0.60	6.13E-10	1800	0.50	5.11E-10			
27	1800	0.40	4.09E-10	1800	1.10	1.12E-09			
28	3600	0.70	3.57E-10	1800	0.70	7.15E-10			



ตารางภาคผนวก ข.7 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 14 : L0.55W0.0 (Control0.55) (ต่อ)

No.	ก่อนตัวอย่างที่ 1			ก่อนตัวอย่างที่ 2			ก่อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
43	3600	0.50	2.55E-10						
44	3600	0.50	2.55E-10						
45	3600	0.60	3.06E-10						
46	3600	0.50	2.55E-10						
47	3600	0.40	2.04E-10						
48	3600	0.50	2.55E-10						
49	3600	0.50	2.55E-10						
50	3600	0.50	2.55E-10						

ตารางภาคผนวก ข.8 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 15 : L0.50W0.0 (Control0.50)

No.	ก่อนตัวอย่างที่ 1			ก่อนตัวอย่างที่ 2			ก่อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
1	1800	2.50	2.55E-09	600	7.80	2.39E-08	600	7.40	2.27E-08
2	1800	1.40	1.43E-09	600	6.60	2.02E-08	600	7.10	2.18E-08
3	1800	1.20	1.23E-09	600	6.80	2.08E-08	600	6.80	2.08E-08
4	1800	1.20	1.23E-09	600	6.60	2.02E-08	600	6.20	1.9E-08
5	1800	1.10	1.12E-09	600	6.00	1.84E-08	600	6.50	1.99E-08
6	66600	11.50	3.17E-10	600	6.10	1.87E-08	600	6.20	1.9E-08
7	1800	1.70	1.74E-09	600	5.70	1.75E-08	600	7.20	2.21E-08
8	1800	1.30	1.33E-09	600	7.10	2.18E-08	600	6.70	2.05E-08
9	1800	1.20	1.23E-09	600	6.90	2.11E-08	600	6.60	2.02E-08
10	1800	1.10	1.12E-09	600	6.30	1.93E-08	600	6.50	1.99E-08
11	1800	1.10	1.12E-09	600	5.90	1.81E-08	600	6.20	1.9E-08
12	1800	1.30	1.33E-09	600	5.80	1.78E-08	600	5.90	1.81E-08
13	1800	0.50	5.11E-10	600	5.70	1.75E-08	600	6.00	1.84E-08
14	1800	1.00	1.02E-09	600	5.60	1.72E-08			

ตารางภาคผนวก ข.8 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ส่วนผสมที่ 15 : L.0.50W.0 (Control.0.50) (ต่อ)

No.	ก้อนตัวอย่างที่ 1			ก้อนตัวอย่างที่ 2			ก้อนตัวอย่างที่ 3		
	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$\Delta t$ (sec)	$\Delta h$ (cm)	Q (m <sup>3</sup> /sec)
15	1800	0.90	9.19E-10	600	7.30	2.24E-08			
16	1800	1.00	1.02E-09	600	6.80	2.08E-08			
17	1800	1.00	1.02E-09	600	6.40	1.96E-08			
18	1800	1.00	1.02E-09	600	6.30	1.93E-08			
19	1800	1.00	1.02E-09	600	6.00	1.84E-08			
20	1800	1.00	1.02E-09	600	6.00	1.84E-08			
21	1800	1.00	1.02E-09	600	5.80	1.78E-08			

ตารางภาคผนวก ข.9 การสักร่อนของซีเมนต์โพสิเทออร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 2 : L0.55W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 1

Name: L0.55W5.0		Samples No. 1		Mix No.2#		AL/B =0.55		Slump = 15 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L<sub>t</sub></sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.159	9.353	1000	0.00681		0	0.070713	0	G5.Mix.2
Round 1	12	16.029	9.268	1000		0.006761	0.00004		0.0006	No.1
Round 2	24	15.895	9.189	1000		0.006706	0.00010		0.0014	
Round 3	36	15.764	9.106	1000		0.006658	0.00015		0.0021	
Round 4	48	15.632	9.024	1000		0.006608	0.00020		0.0028	
Round 5	60	15.500	8.942	1000		0.006558	0.00025		0.0035	
Round 6	72	15.368	8.860	1000		0.006508	0.00030	End	0.0042	m.



ตารางภาคผนวก ข.10 การสักร่อนของซีโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 2 : L0.55W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 2

Name: L0.55W5.0		Samples No. 2		Mix No.2#		AL/B = 0.55		Slump = 15 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L<sub>t</sub></sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.059	9.292	1000	0.00677		0	0.070713	0	G5.Mix.2
Round 1	12	16.007	9.269	1000		0.006738	0.00003		0.0004	No.2
Round 2	24	15.928	9.226	1000		0.006702	0.00007		0.0009	
Round 3	36	15.867	9.196	1000		0.006671	0.00010		0.0014	
Round 4	48	15.802	9.163	1000		0.006638	0.00013		0.0018	
Round 5	60	15.736	9.130	1000		0.006606	0.00016		0.0023	
Round 6	72	15.671	9.097	1000		0.006573	0.00019	End	0.0027	m.

ตารางภาคผนวก ข.11 การสีกร่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 2 : L0.55W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 3

Name: L0.55W5.0		Samples No. 3		Mix No.2#		AL/B =0.55		Slump = 15 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L<sub>t</sub></sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.168	10.721	1000	0.00545		0	0.070713	0	G5.Mix.2
Round 1	12	16.049	9.291	1000		0.006758	0.00001		0.0001	No.3
Round 2	24	15.992	9.260	1000		0.006732	0.00004		0.0005	
Round 3	36	15.927	9.222	1000		0.006705	0.00006		0.0009	
Round 4	48	15.867	9.189	1000		0.006679	0.00009		0.0012	
Round 5	60	15.806	9.154	1000		0.006652	0.00011		0.0016	
Round 6	72	15.745	9.120	1000		0.006626	0.00014	End	0.0020	m.

ตารางภาคผนวก ข.12 การสักร่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 3 : L0.50W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 1

Name: L0.50W5.0		Samples No. 1		Mix No.3#		AL/B = 0.50		Slump = 5 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	VL <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.453	9.489	1000	0.00696		0	0.070713	0	G5.Mix.3
Round 1	12	16.417	9.465	1000		0.006952	0.00001		0.0002	No.1
Round 2	24	16.365	9.422	1000		0.006943	0.00002		0.0003	
Round 3	36	16.3237	9.3917	1000		0.006932	0.00003		0.0005	
Round 4	48	16.2797	9.3582	1000		0.006922	0.00004		0.0006	
Round 5	60	16.2357	9.3247	1000		0.006911	0.00005		0.0007	
Round 6	72	16.1917	9.2912	1000		0.006901	0.00006	End	0.0009	m.

ตารางภาคผนวก ข.13 การสักร่อนของซีเมนต์โพลิเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 3 : L0.50W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 2

Name: L0.50W5.0		Samples No. 2		Mix No.3#		AL/B = 0.50		Slump = 5 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	VL <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.513	9.515	1000	0.00700		0	0.070713	0	G5.Mix.3
Round 1	12	16.508	9.514	1000		0.006994	0.00000		0.0001	No.2
Round 2	24	16.503	9.513	1000		0.006999	0.00001		0.0001	
Round 3	36	16.498	9.512	1000		0.006986	0.00001		0.0002	
Round 4	48	16.493	9.511	1000		0.006982	0.00002		0.0002	
Round 5	60	16.488	9.510	1000		0.006978	0.00002		0.0003	
Round 6	72	16.483	9.509	1000		0.006974	0.00002	End	0.0003	m.

ตารางภาคผนวก ข.14 การสักร่อนของซีเมนต์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 3 : L0.50W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 3

Name: L0.50W5.0		Samples No. 3		Mix No.3#		AL/B = 0.50		Slump = 5 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	VL <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.368	9.461	1000	0.00691		0	0.070713	0	G5.Mix.3
Round 1	12	16.311	9.426	1000		0.006885	0.00002		0.0003	No.3
Round 2	24	16.254	9.390	1000		0.006864	0.00004		0.0006	
Round 3	36	16.196	9.359	1000		0.006837	0.00007		0.0010	
Round 4	48	16.139	9.323	1000		0.006817	0.00009		0.0013	
Round 5	60	16.082	9.288	1000		0.006795	0.00011		0.0016	
Round 6	72	16.025	9.253	1000		0.006773	0.00013	End	0.0019	m.

ตารางภาคผนวก ข.15 การสักร่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 9 : B0.60W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 1

Name: B0.60W5.0		Samples No. 1		Mix No.9#		AL/B = 0.60		Slump = 15 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	VL <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	15.974	9.314	1000	0.00666		0	0.07071	0	G5.Mix.9
Round 1	12	15.798	9.215	1000		0.006583	0.00008		0.0011	No.1
Round 2	24	15.602	9.107	1000		0.006495	0.00016		0.0023	
Round 3	36	15.424	9.003	1000		0.006421	0.00024		0.0034	
Round 4	48	15.234	8.896	1000		0.006338	0.00032		0.0046	
Round 5	60	15.047	8.790	1000		0.006257	0.00040		0.0057	
Round 6	72	14.860	8.684	1000		0.006176	0.00048	End	0.0068	m.

ตารางภาคผนวก ข.16 การสักร่อนของซีเมนต์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 9 : B0.60W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 2

Name: B0.60W5.0		Samples No. 2		Mix No.9#		AL/B = 0.60		Slump = 15 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L-t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.31	9.51	1000	0.00680		0	0.07071	0	G5.Mix.9
Round 1	12	16.139	9.409	1000		0.00673	0.00007		0.0010	No.2
Round 2	24	15.946	9.298	1000		0.006648	0.00015		0.0021	
Round 3	36	15.77	9.193	1000		0.006577	0.00022		0.0032	
Round 4	48	15.588	9.087	1000		0.006501	0.00030		0.0042	
Round 5	60	15.4067	8.9808	1000		0.006426	0.00037		0.0053	
Round 6	72	15.2254	8.875	1000		0.006351	0.00045	End	0.0064	m.

ตารางภาคผนวก ข.17 การสีก่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 9 : B0.60W5.0 ก่อนตัวอย่างที่ 3

Name: B0.60W5.0		Samples No. 3		Mix No.9#		AL/B = 0.60		Slump = 15 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>f</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>Lt</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	15.739	9.181	1000	0.00656		0	0.07071	0	G5.Mix.9
Round 1	12	15.673	9.142	1000		0.006531	0.00003		0.0004	No.3
Round 2	24	15.623	9.115	1000		0.006508	0.00005		0.0007	
Round 3	36	15.561	9.075	1000		0.006486	0.00007		0.0010	
Round 4	48	15.503	9.042	1000		0.006461	0.00010		0.0014	
Round 5	60	15.445	9.008	1000		0.006437	0.00012		0.0017	
Round 6	72	15.386	8.973	1000		0.006413	0.00014	End	0.0020	m.



ตารางภาคผนวก ข.18 การสีก่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 14 : L0.55W0.0 (Control0.55) ก่อนตัวอย่างที่ 1

Name: L0.55W0.0		Samples No. 1		Mix No.14#		AL/B = 0.55		Slump = 26 mm.		Remark
Round	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L-t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
(12 hr./round)										
Start	0	15.521	8.713	1000	0.00681		0	0.070713	0	
Round 1	12	15.281	8.579	1000		0.006702	0.00011		0.0015	
Round 2	24	15.061	8.474	1000		0.006587	0.00022		0.0031	
Round 3	36	15.058	8.472	1000		0.006586	0.00022		0.0031	
Round 4	48	14.828	8.353	1000		0.006476	0.00033		0.0047	
Round 5	60	14.659	8.275	1000		0.006385	0.00042		0.0060	
Round 6	72	14.491	8.197	1000		0.006294	0.00051	End	0.0073	m.

ตารางภาคผนวก ข.19 การสีก่อนของซีโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 14 : L0.55W0.0 (Control0.55) ก่อนตัวอย่างที่ 2

Name: L0.55W0.0		Samples No. 2		Mix No.14#		AL/B = 0.55		Slump = 26 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>Lt</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	15.953	8.953	1000	0.00700		0	0.070713	0	
Round 1	12	15.878	8.917	1000		0.006961	0.00004		0.0006	
Round 2	24	15.81	8.881	1000		0.006929	0.00007		0.0010	
Round 3	36	15.716	8.832	1000		0.006884	0.00012		0.0016	
Round 4	48	15.645	8.796	1000		0.006849	0.00015		0.0021	
Round 5	60	15.567	8.7561	1000		0.006811	0.00019		0.0027	
Round 6	72	15.489	8.716	1000		0.006773	0.00023	End	0.0032	m.

ตารางภาคผนวก ข.20 การสักร่อนของซีเมนต์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 14 : L0.55W0.0 (Control0.55) ก่อนตัวอย่างที่ 3

Name: L0.55W0.0		Samples No. 3		Mix No.14#		AL/B = 0.55		Slump = 26 mm.		Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L<sub>t</sub></sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	15.263	8.587	1000	0.00668		0	0.070713	0	
Round 1	12	15.180	8.552	1000		0.006628	0.00005		0.0007	
Round 2	24	15.160	8.543	1000		0.006617	0.00006		0.0008	
Round 3	36	15.149	8.536	1000		0.006613	0.00006		0.0009	
Round 4	48	15.0975	8.514	1000		0.006584	0.00009		0.0013	
Round 5	60	15.061	8.498	1000		0.006564	0.00011		0.0016	
Round 6	72	15.025	8.482	1000		0.006544	0.00013	End	0.0019	m.

ตารางภาคผนวก ข.21 การสีก่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 15 : L0.50W0.0 (Control0.50) ก่อนตัวอย่างที่ 1

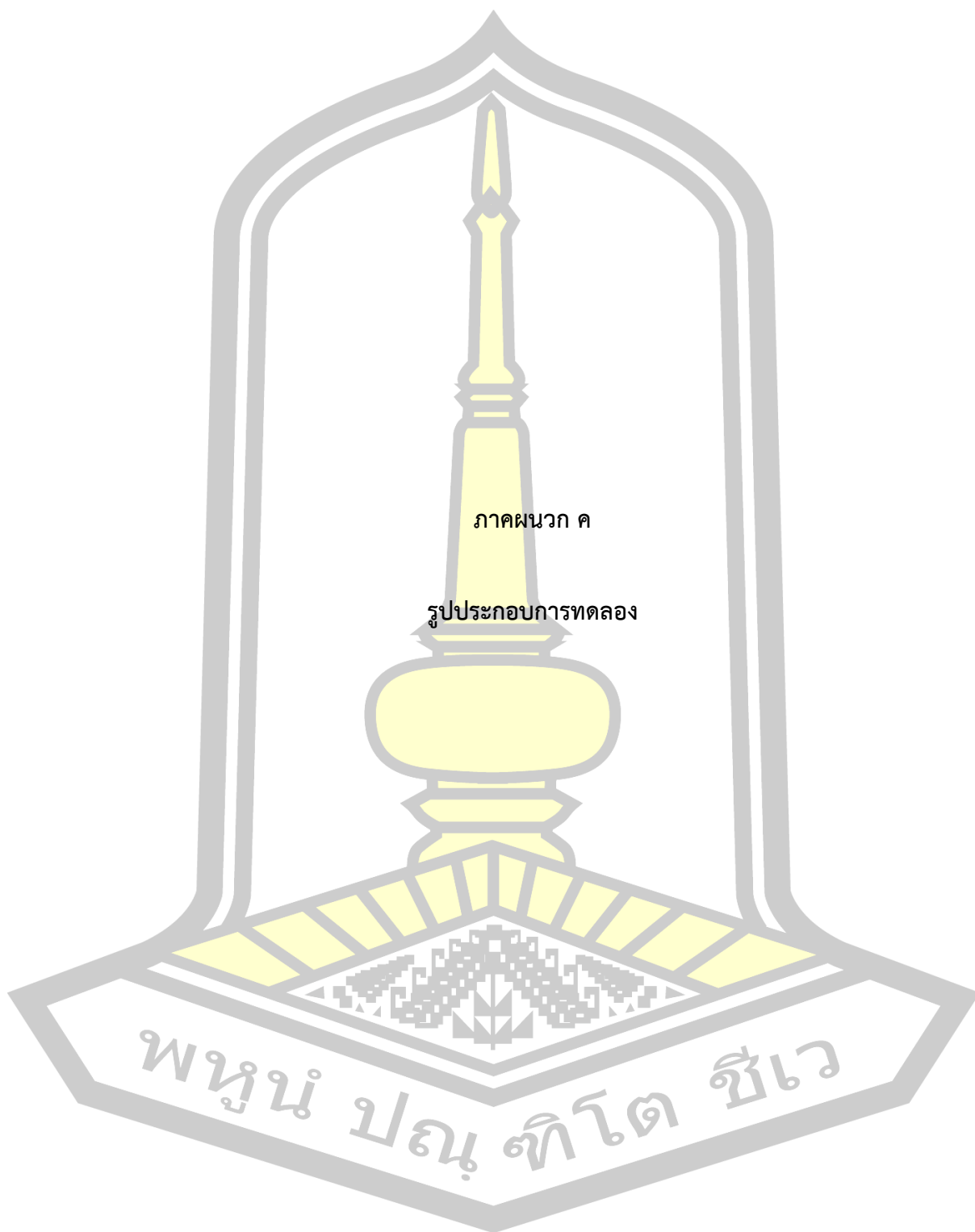
Name: L0.50W0.0		Samples No. 1		Mix No.15#		AL/B = 0.50		Slump = 15 mm.		Remark
Round	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L-t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.517	9.527	1000	0.00699		0	0.07071	0	
Round 1	12	16.453	9.493	1000		0.00696	0.00003		0.0004	
Round 2	24	16.340	9.426	1000		0.006914	0.00008		0.0011	
Round 3	36	16.149	9.319	1000		0.00683	0.00016		0.0023	
Round 4	48	16.0605	9.2685	1000		0.006792	0.00020		0.0028	
Round 5	60	15.939	9.199	1000		0.006739	0.00025		0.0035	
Round 6	72	15.817	9.130	1000		0.006687	0.00030	End	0.0043	m.

ตารางภาคผนวก ข.22 การสีก่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 15 : L0.50W0.0 (Control0.50) ก่อนตัวอย่างที่ 2

Name: L0.50W0.0		Samples No. 2		Mix No.15#		AL/B = 0.50		Slump = 15 mm.		Remark
Round	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>Lt</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
Start	0	16.648	9.598	1000	0.00705		0	0.070713	0	
Round 1	12	16.569	9.555	1000		0.007014	0.00004		0.0005	
Round 2	24	16.471	9.495	1000		0.006976	0.00007		0.0010	
Round 3	36	16.358	9.429	1000		0.006929	0.00012		0.0017	
Round 4	48	16.270	9.378	1000		0.006892	0.00016		0.0022	
Round 5	60	16.173	9.321	1000		0.006852	0.00020		0.0028	
Round 6	72	16.076	9.264	1000		0.006812	0.00024	End	0.0034	m.

ตารางภาคผนวก ข.23 การสีก่อนของซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ส่วนผสมที่ 15 : L0.50W0.0 (Control0.50) ก่อนตัวอย่างที่ 3

Name: L0.50W0.0		Samples No. 3		Mix No.15#		AL/B = 0.50		Slump = 15 mm.		Remark
Round	Time (hr)	W <sub>air</sub> (kg)	W <sub>water</sub> (kg)	G <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>f</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>L-t</sub> (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	ADA <sub>t</sub> (m)	
(12 hr./round)										
Start	0	16.453	9.463	1000	0.00699		0	0.070713	0	
Round 1	12	16.359	9.416	1000		0.006943	0.00005		0.0007	
Round 2	24	16.342	9.387	1000		0.006955	0.00004		0.0005	
Round 3	36	16.247	9.359	1000		0.006888	0.00010		0.0014	
Round 4	48	16.1915	9.321	1000		0.006871	0.00012		0.0017	
Round 5	60	16.128	9.287	1000		0.006841	0.00015		0.0021	
Round 6	72	16.065	9.253	1000		0.006812	0.00018	End	0.0025	m.



ภาคผนวก ค

รูปประกอบการทดลอง

พหุณํ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ ค 1 เก็บวัสดุเก่าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล



ภาพประกอบ ค 2 ตากเก่าชานอ้อยให้แห้งสนิท



ภาพประกอบ ค 3 บดเก่าชานอ้อยให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกรกระทบ





ภาพประกอบ ค 4 เถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดละเอียด



ภาพประกอบ ค 5 ตากตะกอนน้ำประปาให้แห้งสนิท



ภาพประกอบ ค 6 คัดแยกขนาดตะกอนน้ำประปาก่อนนำไปเผา



ภาพประกอบ ค 7 เเผตะกอนน้ำประปาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพประกอบ ค 8 ตะกอนประปาหลังจากเเผที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ถาดขวามือ)



ภาพประกอบ ค 9 ตะกอนน้ำประปาเเผที่ผ่านการบดละเอียด



ภาพประกอบ ค 10 เตรียมหินปูนย่อย ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง



ภาพประกอบ ค 11 เตรียมหินบะซอลต์ ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง



ภาพประกอบ ค 12 ชุดทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย





ภาพประกอบ ค 13 อุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ภาพประกอบ ค 14 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนผสมอย่างน้อย 24 ชั่วโมง



ภาพประกอบ ค 15 การผสมจีโอโพลิเมอร์โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีต



ภาพประกอบ ค 16 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพประกอบ ค 17 ใส่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลงในแบบหล่อคอนกรีต



ภาพประกอบ ค 18 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเสร็จ



ภาพประกอบ ค 19 นำตัวอย่างบ่มในตู้อบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพประกอบ ค 20 ลักษณะจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แกะออกจากแบบหล่อ



ภาพประกอบ ค 21 นำตัวอย่างทดสอบการรับกำลังด้วยเครื่อง UTM 300 ตัน





ภาพประกอบ ค 22 การทดสอบกำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่าง



ภาพประกอบ ค 23 ลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่าง



ภาพประกอบ ค 24 ตัดตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ



ภาพประกอบ ค 25 เตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ



ภาพประกอบ ค 26 เครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ



ภาพประกอบ ค 27 หล่อตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบหาค่าการสีกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต





ภาพประกอบ ค 28 เครื่องทดสอบหาค่าการสีกร่อนของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต



ภาพประกอบ ค 29 การชั่งน้ำหนักก่อนตัวอย่างขณะทดสอบหาค่าการสีกร่อน



ภาพประกอบ ค 30 ก่อนตัวอย่างหลังการทดสอบ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายอดิศักดิ์ ชนะพันธ์
วันเกิด	วันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2523
สถานที่เกิด	75 หมู่ที่ 9 บ้านเหล่าฮก ตำบลหนองผือ อำเภอเมืองสรวง จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	51 หมู่ที่ 10 บ้านโห่ง ตำบลบ้านตู อำเภอบางบาล จังหวัดร้อยเอ็ด รหัสไปรษณีย์ 45160
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ข้าราชการ กรมทางหลวง ตำแหน่ง วิศวกรโยธาชำนาญการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักก่อสร้างทางที่ 2 กรมทางหลวง
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2536 ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านเหล่าฮก ตำบลหนองผือ อำเภอเมือง สรวง จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2546 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรม โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทัโต ชีเว