



ไฮบริดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ทาร์จากถ้ำซานอ้อย

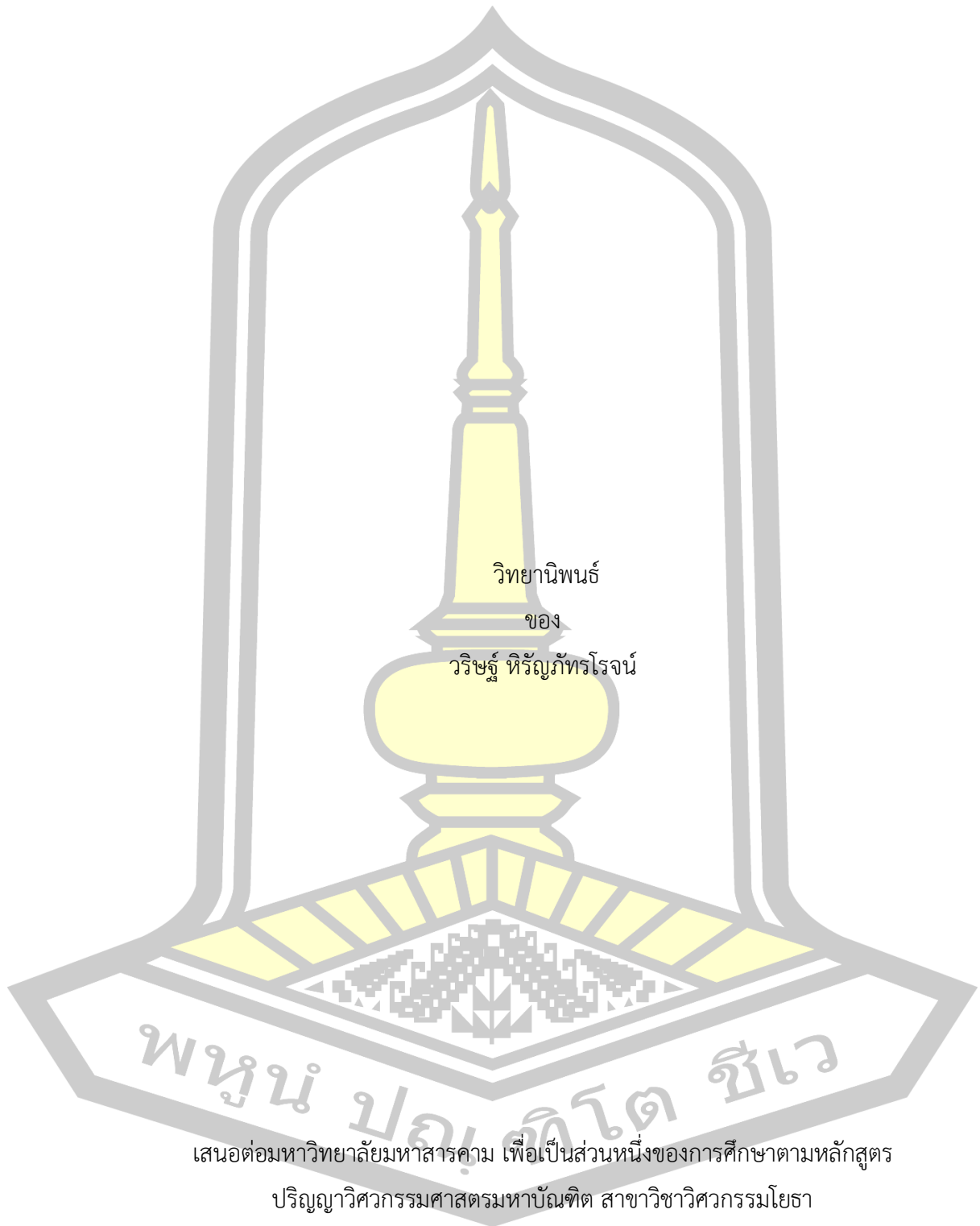
วิทยานิพนธ์  
ของ  
วิรัช หิรัญภัทรโรจน์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ธันวาคม 2562

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ไฮบริดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อย



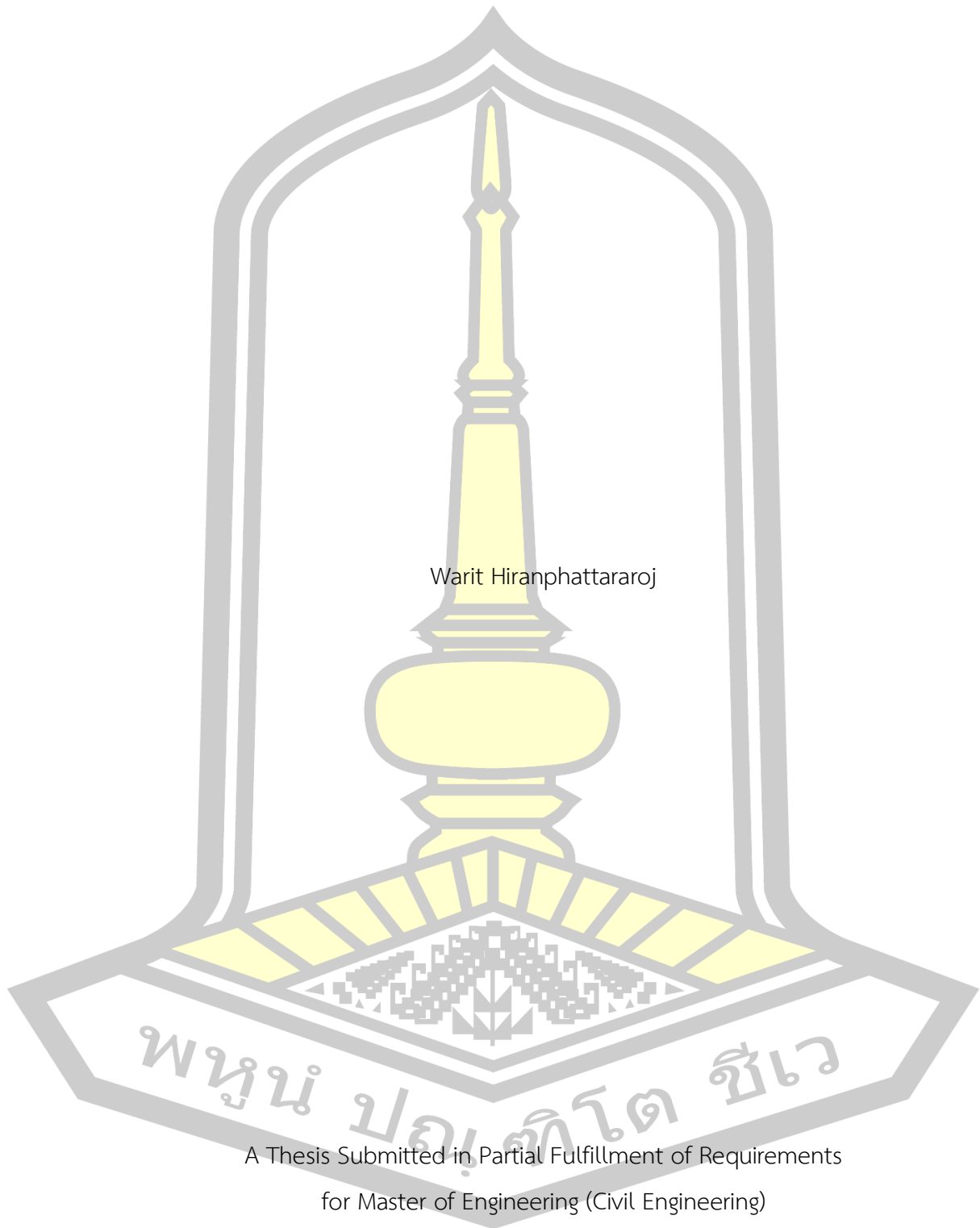
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ธันวาคม 2562

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Hybrid Geopolymer Mortar Made with Bagasse Ash



Warit Hiranphattararoj

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

December 2019

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายวริษฐ์ หิรัญภัทร์โรจน์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สหलग หอมวุฒิม่วงศ์ )

กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม )

กรรมการ

(รศ. ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์ )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ไฮบริดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย		
ผู้วิจัย	วริษฐ์ ธีรัญภัทรโรจน์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สหलग หอมวุฒิมวงค์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย โดยนำทั้งเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าชานอ้อยที่มีการเผาซ้ำ มาปรับปรุงความละเอียดโดยการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคให้ค่าขนาดเกรนเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 มีการใช้ปูนซีเมนต์แทนที่เถ้าชานอ้อยในส่วนผสมร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5-0.6 และกระบวนการบ่มสองวิธีคือ บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และการบ่มน้ำตลอดอายุการทดสอบ และมีการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสม สมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ร้อยละการไหลแผ่ ระยะเวลาก่อตัว และกำลังรับแรงอัดที่อายุต่างๆ

ผลการวิจัยพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ แต่ทำให้ร้อยละการไหลแผ่ลดลง การเพิ่มปริมาณสารละลายทำให้ร้อยละการไหลแผ่เพิ่มขึ้นแต่ลดกำลังรับแรงอัด การใช้เถ้าชานอ้อยเผาซ้ำในส่วนผสมทำให้กำลังรับแรงอัดและการไหลแผ่ดีกว่าเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม การบ่มที่อุณหภูมิทำให้กำลังรับแรงอัดที่สูงในช่วงอายุต้น แต่ในระยะยาวการบ่มเปียกมีการพัฒนากำลังได้ดีกว่า การเติมน้ำในส่วนผสมทำให้กำลังรับแรงอัดและการไหลแผ่ดีขึ้น ในขณะที่การเติมสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมไม่มีผลต่ออัตราการไหลแผ่

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์, เถ้าชานอ้อย, วัสดุเหลือทิ้ง, เผาซ้ำ, กำลังรับแรงอัด, ค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา

พูน ปณ ทัต ชีเว

**TITLE** Hybrid Geopolymer Mortar Made with Bagasse Ash  
**AUTHOR** Warit Hiranphattararoj  
**ADVISORS** Associate Professor Sahalaph Homwouttiwong , Ph.D.  
**DEGREE** Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering  
**UNIVERSITY** Mahasarakham University **YEAR** 2019

### ABSTRACT

This research aims to development of geopolymer mortar made from bagasse ash. Fineness of both original and re-burned bagasse were ground by grinding machine. Particle of bagasse ash retained on the sieve no. 325 less than 5%. Portland cement was used to replace bagasse ash in the mixtures between 5-15% by weight. Alkaline to binder ratio (A/B) was in range of 0.5-0.6. Two curing methods were studied, curing in oven at 75 °C for 48 hours and curing in water bath until testing age. The superplasticizer and water also applied to the mixtures. The properties of bagasse ash geopolymer were investigated, including flow table percentage, setting time and compressive strength at various ages.

The results show that the compressive strength of bagasse ash geopolymer increases as the increasing of Portland cement replacement, but the percentage of flow table decreased. The increasing of alkaline solution leads to high flowable but reduces compressive strength. Re-burned bagasse results of better compressive strength and flowable than the original bagasse ash. High temperature curing results in high compressive strength at an early age. Otherwise, the wet curing has better strength development in later age. The addition of water in the mixtures improves in both of compressive strength and flowable. However, the use of superplasticizer does not significantly effect on the flowable.

Keyword : Geopolymer, Bagasse Ash, Waste Materials, Repeated Sintering, Compressive strength, Loss of ignition

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สพลาภ หอมวุฒิมวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางการศึกษา ทั้งด้านศึกษาหาข้อมูล การทดสอบการวิเคราะห์ผล ตลอดจนตรวจสอบเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปด้วยดี นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย กรรมการสอบ ที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาร่วมให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แก้ไข ให้แนวคิดต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณมีศักดิ์ธนา พัวพิทยากร ท่านอาจารย์ณัฐพงษ์ ลาตบัตร์ และคุณทรงฤทธิ์ พุทธลา ผู้คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่มีการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นสถานที่ในการจัดสร้างการทดสอบและจัดทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัย ที่ได้ช่วยส่งเสริมสนับสนุน กระตุ้นเตือน คอยเอาใจใส่ดูแล ให้กำลังใจและสนับสนุนทุนทรัพย์ในการจัดทำปริญญาบัตรด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

วริษฐ์ หิรัญภัทรโรจน์

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

## สารบัญ

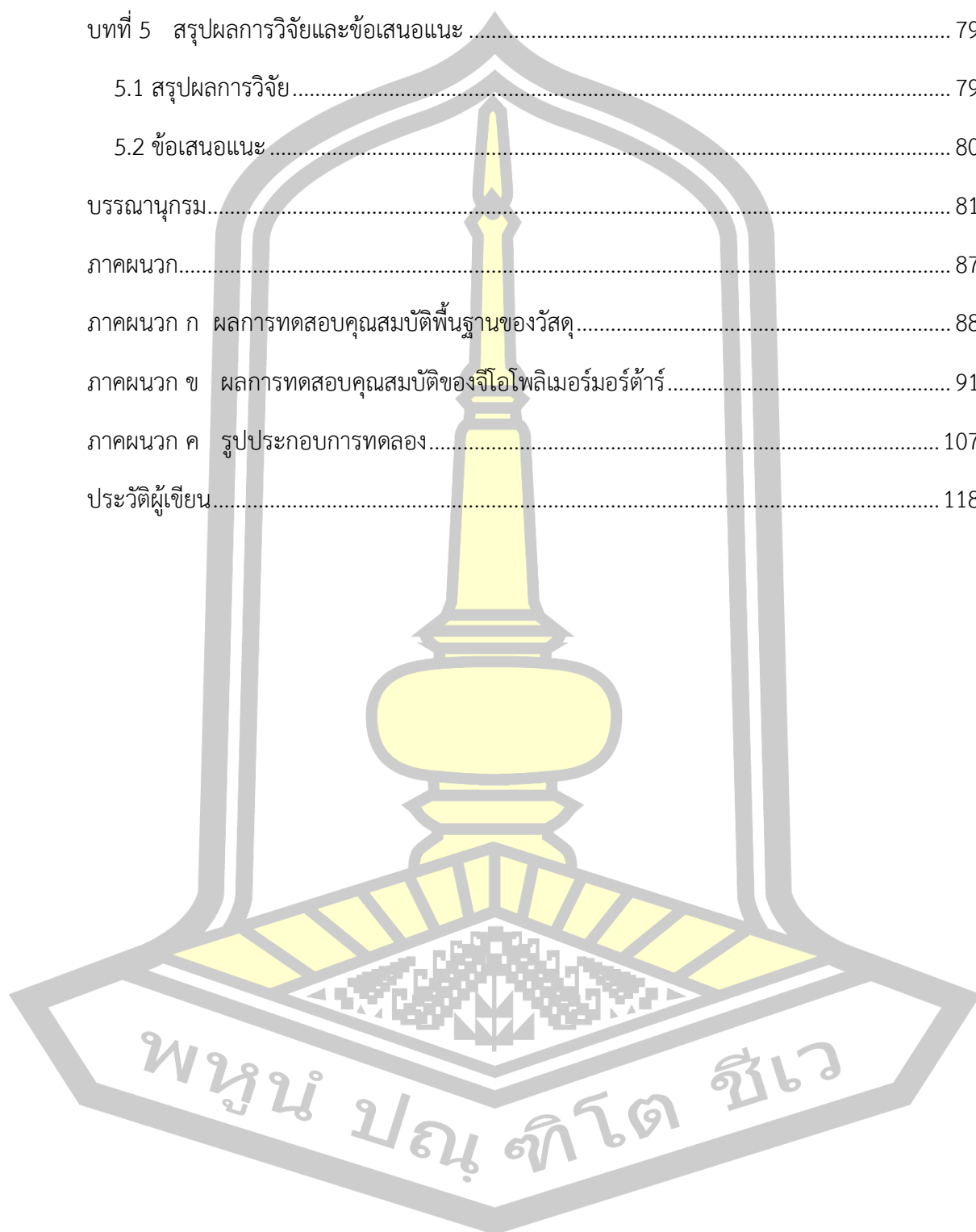
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.3.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ.....	3
1.3.2 การทดสอบ .....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan).....	4
2.1.1 วัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีต.....	5
2.1.2 ถ้ำขานอ้อย.....	6
2.2 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer).....	8
2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement).....	11
2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไร้เซชั่น .....	14
2.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน .....	14
2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน .....	17



2.4.3 ปฏิกริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน.....	18
2.5 ไฮบริดจีโอโพลิเมอร์.....	20
2.5.1 ความสามารถในการทำงานได้.....	20
2.6 สารละลายต่างอัลคาไลน์.....	21
2.6.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	21
2.6.2 สารประกอบซิลิเกต.....	22
2.6.3 ผลกระทบของสารละลายต่างอัลคาไลน์.....	22
2.7 สารลดน้ำพิเศษ.....	22
2.7.1 Sulphonate Naphalene Formaldehyde Condensates.....	23
2.7.2 Sulphonate Melamine Formaldehyde Condensates.....	23
2.8 การบ่มและอุณหภูมิของคอนกรีต.....	24
2.8.1 ความหมายและวัตถุประสงค์การบ่มคอนกรีต.....	24
2.8.2 วิธีการบ่มคอนกรีต.....	24
2.9 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	27
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย.....	27
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย.....	27
2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮบริดซีเมนต์.....	29
2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบ่มและสารผสมเพิ่ม.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.4 คำอธิบายสัญลักษณ์ในงานวิจัย.....	33
3.5 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	34

3.5.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	34
3.5.2 การทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์.....	35
3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	35
3.7 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....	40
3.8 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	41
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	42
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	42
4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าชานอ้อย และมวลรวมละเอียด.....	42
4.1.2 ผลการทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบของเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม เถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ และปูนซีเมนต์.....	43
4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	43
4.2.1 ผลการแทนที่ปูนซีเมนต์.....	43
4.2.2 ผลของการปรับปรุงคุณภาพเถ้าชานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ.....	45
4.2.3 ผลของการเติมน้ำและสารผสมเพิ่ม.....	48
4.3 ผลทดสอบระยะการก่อตัว.....	50
4.3.2 ผลของการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษในเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ.....	52
4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	53
4.4.1 ผลการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม.....	56
4.4.2 ผลการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ.....	61
4.4.3 ผลของอัตราส่วนสารละลาย.....	67
4.4.4 ผลของการปรับปรุงคุณภาพเถ้าชานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ.....	67
4.4.5 ผลของวิธีการบ่ม.....	71
4.4.6 ผลของการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ.....	72
4.4.7 ผลการเปลี่ยนแปลงวิธีการบ่ม.....	76

4.5	ต้นทุนการผลิตของไฮบริดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย.....	77
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	80
	บรรณานุกรม.....	81
	ภาคผนวก.....	87
	ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	88
	ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	91
	ภาคผนวก ค รูปประกอบการทดลอง.....	107
	ประวัติผู้เขียน.....	118



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 เปรียบเทียบประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 .....	5
ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูง และ LOI ต่ำ.....	7
ตาราง 3 สารประกอบหลัก (Major compounds) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	12
ตาราง 4 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 .....	13
ตาราง 5 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกไซด์ต่อปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์.....	13
ตาราง 6 ปริมาณที่ยอมให้ของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	14
ตาราง 7 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบแต่ละตัวภายใต้สภาวะต่างกัน .....	16
ตาราง 8 ค่าความสามารถในการทำงานได้สำหรับงานก่อสร้างชนิดต่าง ๆ เมื่อใช้เครื่องสั่นสะเทือน	21
ตาราง 9 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม วิธีการบ่มร้อน.....	36
ตาราง 10 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ วิธีการบ่มร้อน .....	37
ตาราง 11 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ วิธีการบ่มน้ำ .....	38
ตาราง 12 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อทดสอบผลของสารผสมเพิ่ม.....	39
ตาราง 13 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อทดสอบผลของกรรมวิธีการบ่ม .....	40
ตาราง 14 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ .....	42
ตาราง 15 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
ตาราง 16 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม.....	44
ตาราง 17 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ .....	46
ตาราง 18 เปรียบเทียบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ.....	47
ตาราง 19 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำจากผลการเติมสารผสมเพิ่ม .....	49
ตาราง 20 ผลทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ. 51	

ตาราง 21 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิมโดยกรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และการบ่มน้ำ.....	54
ตาราง 22 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยที่เผาซ้ำโดยกรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ.....	55
ตาราง 23 เปรียบเทียบอัตราส่วนสารละลายต่อเก้าชานอ้อย.....	68
ตาราง 24 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิมและเก้าชานอ้อยเผาซ้ำโดยกรรมวิธีการบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และการบ่มน้ำ .....	73
ตาราง 25 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากผลของการเปลี่ยนแปลงกรรมวิธีการบ่ม.....	76
ตาราง 26 ราคาไฮบริดจีโอโพลิเมอร์จากเก้าชานอ้อยต่อลูกบาศก์เมตร .....	78



## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 แก้วชานอ้อยก่อนบดละเอียดและแก้วชานอ้อยหลังบดละเอียด .....	7
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างแบบสามมิติของจีโอโพลิเมอร์ .....	9
ภาพประกอบ 3 Poly Sialate-Siloxo ซิลิกาต่ออะลูมินา 2 ต่อ 1 .....	9
ภาพประกอบ 4 อัตราการเกิดความร้อนในปูนซีเมนต์ .....	15
ภาพประกอบ 5 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ .....	17
ภาพประกอบ 6 อิทธิพลของแก้วลอยต่อการเกิดความร้อนในซีเมนต์ .....	18
ภาพประกอบ 7 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization).....	19
ภาพประกอบ 8 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	41
ภาพประกอบ 9 ผลทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยดั้งเดิม .....	45
ภาพประกอบ 10 ผลทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยเผาซ้ำ .....	47
ภาพประกอบ 11 ผลทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อย ระหว่าง .....	48
ภาพประกอบ 12 ผลทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ จากการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ .....	50
ภาพประกอบ 13 ผลทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยดั้งเดิมจาก การเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ .....	52
ภาพประกอบ 14 ผลทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยเผาซ้ำจาก การเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ .....	53
ภาพประกอบ 15 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยดั้งเดิม จากวิธีการบ่มอุณหภูมิ ที่อายุต่างๆ .....	58
ภาพประกอบ 16 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยดั้งเดิม จากวิธีการบ่มอุณหภูมิ ที่อายุ 90 วัน .....	58
ภาพประกอบ 17 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยดั้งเดิม จากวิธีการบ่มน้ำ ที่อายุต่างๆ .....	60

ภาพประกอบ 18 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม	61
ภาพประกอบ 19 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มอุณหภูมิต่างๆ	63
ภาพประกอบ 20 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ	63
ภาพประกอบ 21 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มน้ำ ที่อายุต่างๆ	65
ภาพประกอบ 22 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ	66
ภาพประกอบ 23 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม และเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มสองวิธี ที่อายุ 90 วัน	70
ภาพประกอบ 24 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม PC ร้อยละ 15 โดยเปรียบเทียบการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ จากวิธีการบ่มอุณหภูมิต่างๆ และบ่มน้ำที่ อายุ 90 วัน	74
ภาพประกอบ 25 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ PC ร้อยละ 15 โดยเปรียบเทียบการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ จากวิธีการบ่มอุณหภูมิต่างๆ และบ่มน้ำที่ อายุ 90 วัน	75
ภาพประกอบ 26 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ PC ร้อยละ 15 จากการเปลี่ยนแปลงกรรมวิธีการบ่ม	77



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

นับตั้งแต่โลกประสบปัญหาสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ส่งผลต่อปัญหาสภาวะโลกร้อน (Global Warming) มีการเปิดเผยว่าส่วนหนึ่งมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกมาจำนวนมาก และผืนป่าที่ค่อยทำหน้าที่ป้องกันสภาวะเรือนกระจกถูกรุกรานอย่างต่อเนื่อง สิ่งหลักที่ทำให้เกิดขึ้นมาจากการขยายอาณาเขต มีสิ่งปลูกสร้างอย่างมากมาย ในขณะนี้ปัญหาเราจะมุ่งเน้นแก้ไขเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาใช้ในการสิ่งก่อสร้าง เนื่องจากสิ่งก่อสร้างหลักๆ สร้างมาจากปูนซีเมนต์โดยส่วนใหญ่และยังมีการใช้อย่างต่อเนื่องมากขึ้นทำให้เป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ผลกระทบที่ตามมาเลยมีการเร่งผลิตปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นแต่ภายหลังจากนั้นได้มีการศึกษาผลกระทบของการผลิตปูนซีเมนต์ตั้งแต่ขั้นตอนการระเบิดภูเขาที่ทำให้เป็นมลพิษทางอากาศในพื้นที่ใกล้เคียง จากนั้นลำเลียงเพื่อนำมาบดอัดให้มีขนาดเล็กลง ไปจนถึงนำมาเผาที่อุณหภูมิ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ จะเห็นได้ว่าตั้งแต่ขั้นตอนแรกไปจนถึงขั้นตอนสุดท้ายมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกมาทั้งสิ้น ซึ่งได้ศึกษาแล้วว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำนวน 1 ตัน จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกมาประมาณ 1 ตันเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบตามมาอย่างต่อเนื่อง และเมื่อไม่มีการจัดการแก้ไขปัญหาอย่างจริงจังก็จะส่งผลกระทบในระยะยาวต่อคนรุ่นหลัง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นแก้ไขปัญหาที่วัสดุสารตั้งต้นในสิ่งก่อสร้างที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จากการนำวัสดุปอซโซลานที่เป็นของเสียจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม โดยวัสดุเหล่านี้จะต้องมีองค์ประกอบของซิลิกา และอะลูมินา เป็นหลัก จากนั้นการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นต่อเมื่อสารซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) กับสารละลายอัลคาไลน์ที่มีสถานะความเป็นด่างสูง ก่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน ได้สารเชื่อมประสานที่ดี (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

วัสดุปอซโซลานในประเทศไทยที่นิยมนำมาทำเป็นจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ ถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่านดิน ขาวเผา เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาทดแทนหรือร่วมกับงานคอนกรีตได้ โดยมีการศึกษานำวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต พบว่าผลการทดสอบ ถ้ำถ่านหิน จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความเหมาะสมกว่าวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ในด้านกำลังรับ



แรงอัดและลดค่าการซึมผ่านน้ำ (สหลาภ หอมวุฒิมวงค์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549) แต่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือแหล่งเถ้าถ่านหินจะอยู่ไกลออกไป ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาวัสดุปอซโซลานอื่นที่มีอยู่ในพื้นที่ ซึ่งคือ เถ้าชานอ้อย เป็นผลพลอยได้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมโรงงานน้ำตาล เถ้าชานอ้อยนั้นเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าหมุนเวียนภายในโรงงาน โดยวัสดุเหลือทิ้งนี้มีเพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี มากกว่า 1 ล้านตันต่อปี ทำให้เป็นปัญหาต่อการกำจัดทิ้ง จึงได้มีการพัฒนาศึกษาคุณสมบัติเถ้าชานอ้อยในงาน จีโอโพลิเมอร์ พบว่าเมื่อเถ้าชานอ้อยมีความละเอียดสูง มีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถใช้ร่วมหรือทดแทนในงานคอนกรีตได้ ทำให้รับน้ำหนักได้ดีขึ้น ทนต่อสารละลายซัลเฟต อัตราการซึมผ่านน้ำลดลง (สำเร็จ รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม, 2553; อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์, 2551)

งานวิจัยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในประเทศมีการพัฒนาอย่างมาก แต่เถ้าชานอ้อยที่เป็นวัสดุปอซโซลานนั้น สามารถนำมาผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์ได้จริงแต่ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีค่าค่อนข้างต่ำและเนื่องด้วยปริมาณการผลิตมีมากขึ้นประกอบกับยังเป็นวัสดุที่ไม่มีมูลค่า จึงเป็นการดีต่อการศึกษาเพื่อนำไปพัฒนา ซึ่งในหัวข้อการศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน เกิดจากการนำวัสดุปอซโซลานผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส (Bakharev, 2006) จะทำให้มีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มมากขึ้น แต่การใช้อุณหภูมิสูงในการบ่มจีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดความสิ้นเปลือง จึงทำการมองหาแนวทางการแก้ปัญหาโดยอาศัยสิ่งธรรมชาติจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน กระบวนการมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำทำให้เกิดความร้อนขึ้นเอง ดังนั้นจึงนำความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพื่อมาทดแทน (Palomo et al., 2007; Pangdaeng et al., 2014)

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายที่จะผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย โดยนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าชานอ้อย และมีการบ่มด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกัน คือ การบ่มน้ำ และการบ่มด้วยความร้อน และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อสารละลายเพื่อให้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความสามารถในการทำงานได้ และทำการทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อย ได้แก่ กำลังรับแรงอัด และการไหลแผ่ เพื่อนำผลการศึกษาไปปรับเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์

1.2.2 ศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพเถ้าชานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ

1.2.3 ศึกษาผลของการบ่มที่มีต่อจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย

1.2.4 ศึกษาผลของการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษต่อสมบัติจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

### 1.3.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ

- 1) เถ้าชานอ้อย จากโรงงานน้ำตาลมิตรภาพสินธุ์ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์
- 2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 3) ทราายแม่น้ำ ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดในช่วง 2.70-2.80
- 4) สารละลายโซเดียมซิลิเกต
- 5) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์
- 6) สารลดน้ำพิเศษ

### 1.3.2 การทดสอบ

ทดสอบตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ขนาดตัวอย่าง 50x50x50 มิลลิเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร ดังนี้

- เถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและปรับปรุงโดยการเผาซ้ำ
- แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อวัสดุตั้งต้น ในอัตราร้อยละ 0 5 10 และ 15
- เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น ในอัตราร้อยละ 0.5 0.55 และ

0.6

- การบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

1) ทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C230/C230M

2) ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109

3) ทดสอบหาระยะเวลาก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C191

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวัสดุปอซโซลาน จีโอโพลิเมอร์ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ไฮบริดซีเมนต์ สารละลายต่างอัลคาไลน์ สารลดน้ำพิเศษ วิธีการบ่ม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ เพื่อทดสอบความสามารถในการทำงานได้และกำลังรับแรงอัด เป็นต้น โดยมีเอกสารทฤษฎีประกอบดังนี้

#### 2.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ตามมาตรฐาน ASTM C618 ให้คำจำกัดความว่าเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่เมื่อนำมาบดและได้ความละเอียดที่เหมาะสมร่วมกับน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ก่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการยึดประสาน วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้กันส่วนมากในประเทศไทย ได้แก่ เถ้าถ่านหิน ดินขาวเผา และเถ้าชีวมวลต่างๆ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น วัสดุปอซโซลานนิยมใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต เพื่อลดต้นทุนในด้านคอนกรีต เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตและความสามารถในการทำงานเช่นกัน เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีต การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดซ้ำว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่ ทั้งนี้สามารถแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลาน ได้ดังนี้

Class N คือ วัสดุปอซโซลานที่ได้ตามธรรมชาติ เช่น Opaline Chert Shale หรือเถ้าจากภูเขาไฟ เป็นต้น

Class F คือ วัสดุปอซโซลานที่ได้จากการเผาถ่านหินชนิด Anthracite หรือ Bituminous เป็นถ่านหินที่ให้พลังงานความร้อนมาก เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูง

Class C คือ วัสดุปอซโซลานที่ได้จากการเผาถ่านหินชั้นต่ำกว่า เป็นถ่านหินชนิด Lignite และ Subbituminous โดยวัสดุปอซโซลานในหมวดนี้จะมีความสมบัติเป็นซีเมนต์

โดยวัสดุปอซโซลานแต่ละประเภทมีส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ  
ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 เปรียบเทียบประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618

คุณสมบัติ	หมวดวัสดุปอซโซลาน (Class)		
	N	F	C
<b>ส่วนประกอบทางเคมี</b>			
1. ซิลิคอนไดออกไซด์+อะลูมิเนียมออกไซด์+ไอรอนออกไซด์ (ร้อยละต่ำสุด)	70	70	50
2. ร้อยละสูงสุดของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	4	5	5
3. ร้อยละสูงสุดของสารอัลคาไลน์ (Na <sub>2</sub> O)	1.5	1.5	1.5
4. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้สูงสุด (ร้อยละ)	10	6	6
5. ปริมาณความชื้นสูงสุด (ร้อยละ)	3	3	3
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>			
1. ดัชนีกำลังต่ำสุด			
ที่ 7 วัน (ร้อยละ)	75	75	75
ที่ 28 วัน (ร้อยละ)	75	75	75
2. ความต้องการน้ำสูงสุด (ร้อยละ)	115	105	105
3. การขยายตัวหรือหดตัวสูงสุด (ร้อยละ)	0.8	0.8	0.8
4. ปริมาณความชื้นสูงสุด (ร้อยละ)	3	3	3
5. ความละเอียด:ปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 โดยวิธีค้ำตะแกรงสูงสุด (ร้อยละ)	34	34	34

### 2.1.1 วัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีต

ในปัจจุบันมีการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ในงานคอนกรีตจำนวนมาก โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนหรือทั้งหมด เพื่อลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลงและปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบกับคอนกรีตตัวอย่างควบคุมเพื่อเห็นผลที่แตกต่าง สหภาพหอมวุฒิวงศ์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2549) ศึกษาคอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน 3 ชนิด ได้แก่ ถ้ำถ่านหิน (แม่เมาะและกาญจนบุรี) ถ้ำปาล์มน้ำมัน และถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ นำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดละเอียดจนกระทั่งอนุภาคของวัสดุค้ำตะแกรงมาตรฐาน

เบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-70 ควบคุมปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีต 50-100 มิลลิเมตร โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีความเหมาะสม และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1 ของวัสดุประสาน พบว่า วัสดุปอซโซลานทั้ง 3 ชนิด มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมร้อยละ 20 แต่ถ้าผ่านหินจาก กากยวนบุรีมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย ส่วนถ้าผ่านหินจากแม่เมาะสามารถ แทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 70 ค่ากำลังรับแรงอัดยังสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ถ้าปาล์มน้ำมันสามารถแทนที่ ได้สูงสุดร้อยละ 20 เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ขึ้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงอย่างมี นัยสำคัญ และถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 40

### 2.1.2 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาจากโรงงานน้ำตาลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใน การผลิตพลังงานใช้ในโรงงาน มีการตรวจสอบพบว่าประเทศไทยมียอดการผลิตอ้อยทั้งหมด 130 ล้าน ตัน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล, 2560) ดังนั้นหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลและเผา ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงแล้ว ก่อให้เกิดเถ้าขานอ้อยสูงประมาณ 800,000 ตันต่อปี โดยเถ้าขานอ้อยถูก นำมาใช้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่ได้ เช่น การนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับปรุงสภาพดินในงาน เกษตรกรรม หรือกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ และยังมีผลกระทบจากฝุ่นละอองของเถ้าขานอ้อยอีกด้วย (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

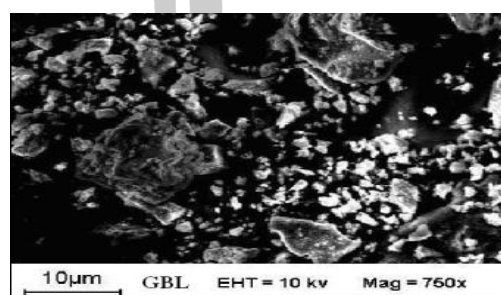
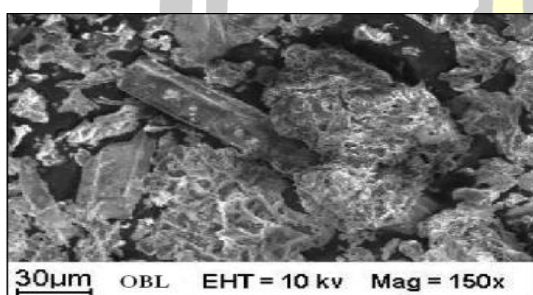
เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash) ถือเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง ลักษณะทางกายภาพทั่วไปนั้น จะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ลักษณะไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง ขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไป เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคและความพรุนลดลงเมื่อ เทียบกับเถ้าขานอ้อยก่อนบด เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าขานอ้อยหลังบดมีเพียงขนาดอนุภาคและความ พรุนลดลงเท่านั้น แต่ความเป็นเหลี่ยมมุมและรูปร่างไม่แน่นอนยังคงเดิม ดังภาพประกอบ 2.1 (คารวี มณฑการติวงศ์, 2548)

#### ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition: LOI) ของเถ้าขานอ้อยมีค่า ค่อนข้างสูง โดยอาจสูงถึงร้อยละ 10-25 การที่ LOI ของเถ้าขานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงลักษณะ เช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป อย่างไรก็ตามค่า LOI ที่สูงไม่ได้เป็นเพียงคาร์บอนหรือกากขานอ้อยที่ เผาไหม้ไม่หมด แต่เป็นสารประกอบอื่นที่สลายภายใต้การเผาที่อุณหภูมิสูง จากการทดสอบเผา ตัวอย่างเถ้าขานอ้อยอุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2555) ดังนั้นเถ้าขานอ้อยที่มีค่า LOI สูงอาจไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออัตราลดกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่มีส่วนผสมเถ้าขานอ้อยในปริมาณต่ำมากนัก แต่หากมีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูงหรือใช้



เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุประสาน ค่า LOI ที่สูงจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด (นัฐภพ ถานะวุฒิพงศ์ และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2557) ดังนั้นเมื่อศึกษาเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูง และเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ต่ำ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 67-77  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 4-6 จากการศึกษา เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI อยู่ในช่วงร้อยละ 3-20 เมื่อเปรียบเทียบเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูงและเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ต่ำ เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูง มักจะมีซิลิกาต่ำกว่าเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ต่ำ และเมื่อพิจารณาสามารถจัดเถ้าชานอ้อยอยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ เมื่อดูองค์ประกอบทางเคมีจากตาราง 2 ในด้านงานคอนกรีตพบว่าเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI ต่ำให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI สูงทุกอัตราส่วนผสม (คารวี มนทการติวงศ์, 2548)



ก) เถ้าชานอ้อยก่อนบด

ข) เถ้าชานอ้อยหลังบด

ภาพประกอบ 1 เถ้าชานอ้อยก่อนบดละเอียดและเถ้าชานอ้อยหลังบดละเอียด

ที่มา : คารวี มนทการติวงศ์, 2548

ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูง และ LOI ต่ำ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	เถ้าชานอ้อย LOI ต่ำ	เถ้าชานอ้อย LOI สูง
$\text{SiO}_2$	76.8	67.1
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4.4	5.69
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8.04	2.54
CaO	5.44	2.93
MgO	0.94	0.45
$\text{SO}_3$	0.09	0.03
LOI	3.28	20.36

ที่มา : คารวี มนทการติวงศ์, 2548

## 2.2 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุที่มีอะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) ถูกค้นพบโดย Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ในเวลาต่อมามีการนิยามความหมายของจีโอโพลิเมอร์ ขึ้นครั้งแรกโดย Joseph Davidovits นักเคมี ชาวฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1978 ว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เกิดจากวัสดุปอซโซลานที่มีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก ผสมกับอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและรับกำลังอัดได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีลักษณะคล้ายกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งสารจีโอโพลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Davidovits, 1999) ดังสมการ (2.1)



โดย M คือ ธาตุอัลคาไลน์

- คือ การยึดเกาะ (Bond)

Z คือ จำนวนโมเลกุลของ  $\text{Si-O}_2$  เท่ากับ 1 2 หรือ 3

n คือ ปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่

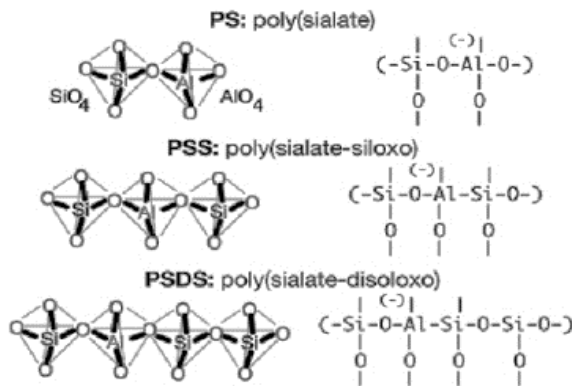
w คือ จำนวนโมเลกุลน้ำ

ถ้า Z มีค่าเป็น 1 เรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

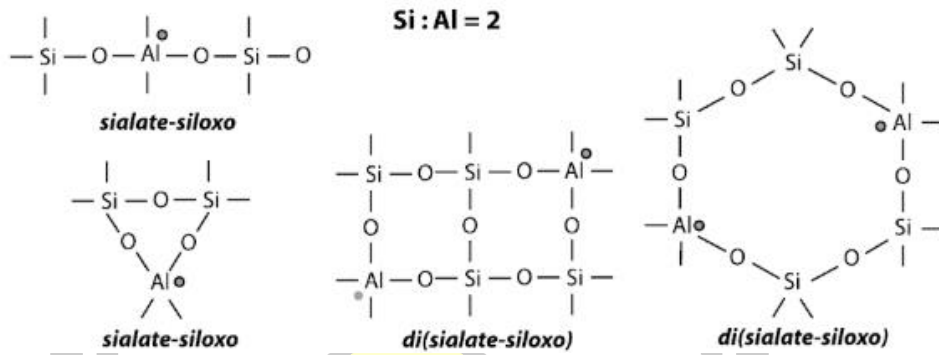
ถ้า Z มีค่าเป็น 2 เรียกว่า โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (PSS)

ถ้า Z มีค่าเป็น 1 เรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (PSDS)

การเกิดกลไกของจีโอโพลิเมอร์นั้น จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ โดยวัสดุจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่างเพื่อทำให้ซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุเหล่านี้ อยู่ในสถานะพร้อมทำปฏิกิริยาหลังจากนั้นก็จะใช้โซเดียมซิลิเกตเข้าไปเพื่อทำหน้าที่รวมตัวกันในลักษณะของโครงสร้างแบบสามเหลี่ยม ซึ่งถ้าเกิดซิลิกาต่ออะลูมินา 1 ต่อ 1 จะเรียกโครงสร้างเป็นโพลี PS (Sialate) และถ้าเกิดซิลิกาต่ออะลูมินา 2 ต่อ 1 เรียกโครงสร้างเป็นโพลี PSS (Sialate-Siloxo) ซึ่งในการจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังที่ดีต้องให้อยู่ในอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 2 ต่อ 1 ดังแสดงในภาพประกอบ 2 และ 3



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างแบบสามมิติของจีโอโพลิเมอร์



ภาพประกอบ 3 Poly Sialate-Siloxo ซิลิกาต่ออะลูมินา 2 ต่อ 1

ที่มา : Davidovits J., 2008

ในต่างประเทศ มีการประชุมระดับนานาชาติเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์ ปูนซีเมนต์ และคอนกรีต ในเมืองเพิร์ท ประเทศออสเตรเลีย เพื่อนำจีโอโพลิเมอร์มาใช้งาน (Davidovits, 2008) แต่สำหรับประเทศไทยจีโอโพลิเมอร์ยังคงเป็นเทคโนโลยีใหม่และโรงงานอุตสาหกรรมยังไม่มี การนำมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากยังอยู่ในช่วงการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานในอนาคต ประเทศไทยได้เริ่มทำการวิจัยทางด้านจีโอโพลิเมอร์เริ่มขึ้นเมื่อปลายปี 2547 (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548) โดยเริ่มทดลองผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

ในประเทศไทย ได้มีการศึกษาจีโอโพลิเมอร์มากขึ้น ในช่วงต้นกล่าวว่า การจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังที่ดี วัสดุปอซโซลานต้องให้อยู่ในอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 2 ต่อ 1 โดยมีการนำวัสดุปอซโซลานหลายชนิดที่มีองค์ประกอบของซิลิกาต่ออะลูมินาต่างกันออกไป เพื่อนำมาเปรียบเทียบและพัฒนาเป็นคอนกรีตโดยไม่ต้องแทนที่ปูนซีเมนต์ หรือใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุตั้งต้นทั้งหมด

1) เถ้าถ่านหิน มีอัตราส่วนซิลิการ้อยละ 44-45 และอะลูมินาร้อยละ 23-24 ศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากอัตราส่วน เถ้าลอย:ทราย:สารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 2:1:0.5 ความ



เข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ จากความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 10 15 และ 20 โมลาร์ โดยเพิ่มความสามารถในการทำงานด้วยสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 5 จากอัตราส่วนร้อยละ 1.5 2 2.5 และ 5 ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 และ 4 วัน พบว่าสามารถสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด 685 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการบ่มเป็นเวลา 4 วัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และสันติสุข เข็มชัยตระกูล, 2539)

2) ดินขาวเผา มีอัตราส่วนซิลิการ้อยละ 45 และอะลูมินาร้อยละ 38 ศึกษาการเตรียมดินขาวเผาเพื่อใช้งานในการสร้างจีโอโพลิเมอร์ที่ดีที่สุด พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับดินขาวเผา คือ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.3-1.4 โดยความเข้มข้น 15 โมลาร์ จากนั้นบ่มร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (เจริญชัย ฤทธิรุท และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2550)

3) เถ้าแกลบ มีอัตราส่วนซิลิการ้อยละ 93 และอะลูมินาร้อยละ 0.4 ศึกษาอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Si}/\text{OH}$ ) และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าอัตราส่วน  $\text{Si}/\text{OH}$  2.5 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ โดยการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสสามารถสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ที่อายุ 7 วัน) (สำเร็จ รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม, 2553)

4) เถ้าขานอ้อย มีอัตราส่วนซิลิการ้อยละ 65 และอะลูมินาร้อยละ 5 ศึกษาอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Si}/\text{OH}$ ) และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ โดยการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสสามารถสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ที่อายุ 7 วัน) (สำเร็จ รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม, 2553)

ในด้านการนำจีโอโพลิเมอร์มาใช้งานระยะยาวจำเป็นต้องคำนึงถึงกำลังรับแรงอัดเป็นสำคัญ ได้มีการศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามอายุของก้อนตัวอย่าง เนื่องจากขนาดของ Microcracks และความพรุนลดลง ทำการศึกษาอายุก้อนตัวอย่างตั้งแต่ 28 90 และ 365 วัน (Gunasekara et al., 2016) เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ยังทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุของก้อนตัวอย่างทุกส่วนผสม และในด้านการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การซึมผ่านน้ำและความพรุน เป็นต้น เนื่องจากมีการปรับปรุง Microstructure จากการเติมปูนซีเมนต์ (Mehta and Siddique, 2017)

### 2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

นิยามของคำว่าปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปแล้วหมายถึงวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวเกาะ มีลักษณะเป็นตัวเชื่อมประสาน มีความสามารถที่จะเชื่อมจับ (Bonding) จากอดีตจนถึงปัจจุบันองค์ประกอบทางเคมีหลักที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากอดีตมากนัก (อะลูมินา ซิลิกา และแคลเซียม) ซึ่งวัตถุดิบหลักในการผลิตซีเมนต์คือหินปูน (Limestone) หินตะกอน (Claystone) และหินดินดาน (Shale) โดยหินปูนจะเป็นตัวในแคลเซียม ส่วนหินตะกอนและหินดินดานจะให้ทั้งซิลิกेटและอะลูมินेट ทั้งนี้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะแบ่งออกเป็น 4 ออกไซด์หลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินัมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และออกไซด์ย่อยอื่นๆอีก เช่น  $\text{MgO}$   $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  (Wisniak, 2003)

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลัก (Major compounds) ดังตาราง 3 และมีการศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้นจึงได้ศึกษาอิทธิพลของสารประกอบเพื่อปรับปรุงสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อใช้งานให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น ซึ่งมาตรฐานการแบ่งประเภทปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C150 ได้ 5 ประเภท ดังนี้ และแสดงองค์ประกอบเคมีและสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) ในตาราง 4

1) ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้สำหรับทำคอนกรีตหรือผลิตอุตสาหกรรมทั่วไปที่ไม่ใช้งานเฉพาะ สามารถใช้งานก่อสร้างได้ปกติทั่วไป เช่น พื้น คาน เสา ฐานราก เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีการพัฒนากำลังไม่รวดเร็วมากและระหว่างทำปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิดความร้อนปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับประเภทอื่น

2) ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ดัดแปลง (Modified Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีลักษณะคล้ายกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 4 และ ประเภทที่ 5 ผสมกัน แต่มีความสามารถในระดับปานกลางเพียงเท่านั้น ซึ่งคือ เป็นปูนซีเมนต์ที่ก่อให้เกิดความร้อนไม่สูงมากนัก (น้อยกว่าประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าประเภทที่ 4) มีกำลังใกล้เคียงปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 สำหรับปูนซีเมนต์ดัดแปลงเหมาะสำหรับทำคอนกรีตหรืออุตสาหกรรมที่สร้างความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

3) ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันรวดเร็วทำให้มีกำลังสูงในช่วงระยะเวลาแรก แต่มีความร้อนสูงเนื่องจากปริมาณ  $\text{C}_3\text{S}$  สูง สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความรวดเร็ว เช่น งานซ่อมแซม ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เป็นต้น

4) ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ตรงข้ามกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 โดยมีปริมาณ  $\text{C}_3\text{S}$  ต่ำ มีปริมาณ

ร้อยละ 25 ถึง 30 ทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำและมี  $C_2S$  ค่อนข้างสูงมีปริมาณร้อยละ 50 ถึง 60 สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับงานคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ไม่ต้องการความร้อน เช่น เขื่อนหรือตอม่อ เป็นต้น

5) ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) สามารถทนซัลเฟตได้สูง ซัลเฟตเกิดปฏิกิริยากับ  $C_3A$  โดยตรง เนื่องจากปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ  $C_3A$  ต่ำ ไม่เกินร้อยละ 5 ทำให้เกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย การกักต่อนเนื่องจากการละลายซัลเฟตจึงลดลง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต เช่น โครงสร้างในทะเล

ผลกระทบของปริมาณออกไซด์ต่อสัดส่วนสารประกอบหลักมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นอย่างมาก การปรับแต่งสัดส่วนของสารประกอบหลักส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการเกิดไฮเดรชันให้ช้าลงหรือเร็วขึ้น รวมไปถึงความสามารถในการต้านทานซัลเฟต การปรับเปลี่ยนสัดส่วน หรือปริมาณสารประกอบหลักนั้น สามารถทำได้โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของออกไซด์ตั้งต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกไซด์บางชนิดเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติคอนกรีตเป็นอย่างมาก เช่นในตาราง 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วน  $C_3S$  และ  $C_2S$  อย่างเห็นได้ชัดในปูนซีเมนต์ตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 เพียงแค่ลดปริมาณ Lime ลงเพียงร้อยละ 3 หรือในปูนซีเมนต์ตัวอย่างที่ 3 ที่มีปริมาณอะลูมินาและไอรอนต่างกันเพียงร้อยละ 1.5 ก็สามารถทำให้ปูนซีเมนต์มีสารประกอบหลักต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

จึงได้มีการกำหนดปริมาณของออกไซด์ในกรณีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ (Ordinary Portland Cement) ประเภท 1 เพื่อให้ได้ออกไซด์แต่ละตัวที่ยอมให้ในวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังในตาราง 6 เพื่อให้ได้ซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

ตาราง 3 สารประกอบหลัก (Major compounds) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	องค์ประกอบ	ตัวย่อ
Tricalcium Silicate	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
Dicalcium Silicate	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
Tricalcium Aluminate	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
Tetracalcium Aluminoferrite	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$
Calcium Sulfate Dihydrate	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CSH_2$

ที่มา : ปิติ สุคนธ์สุขกุล, 2556

ตาราง 4 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C <sub>3</sub> S	49	46	56	25	30
C <sub>2</sub> S	25	29	15	50	46
C <sub>3</sub> A	12	6	12	5	5
C <sub>4</sub> AF	8	12	8	12	13
ความละเอียดของอนุภาค (ชม. <sup>2</sup> /กรัม)	3,000	3,000	4,500	3,000	3,000
กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน (กก./ชม. <sup>2</sup> )	180	150	310	80	120
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

ที่มา : ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547

ตาราง 5 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกไซด์ต่อปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์

ออกไซด์	ตัวอย่างที่		
	1	2	3
ออกไซด์หลัก			
CaO	66.0	64.0	66.0
SiO <sub>2</sub>	20.0	22.0	20.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.0	7.7	5.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.0	3.3	4.5
SO <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.03
Others	3.9	3.9	3.9
สารประกอบหลัก			
C <sub>3</sub> S	65.2	36.7	73.2
C <sub>2</sub> S	8.5	35.6	2.5
C <sub>3</sub> A	13.5	14.8	7.0
C <sub>4</sub> AF	9.1	10.0	13.7

ที่มา : W. Czernin, 1962

ตาราง 6 ปริมาณที่ยอมให้ของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อออกไซด์	ปริมาณที่ยอมให้ (ร้อยละ)
CaO	60-67
SiO <sub>2</sub>	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-0.6
MgO	0.5-4.0
Alkalis (Na <sub>2</sub> O)	0.3-1.2
SO <sub>3</sub>	2.0-3.5

ที่มา : Neville A.M., 1995

## 2.4 ปฏิกริยาไฮเดรชัน ปฏิกริยาปอซโซลานและปฏิกริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน

### 2.4.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

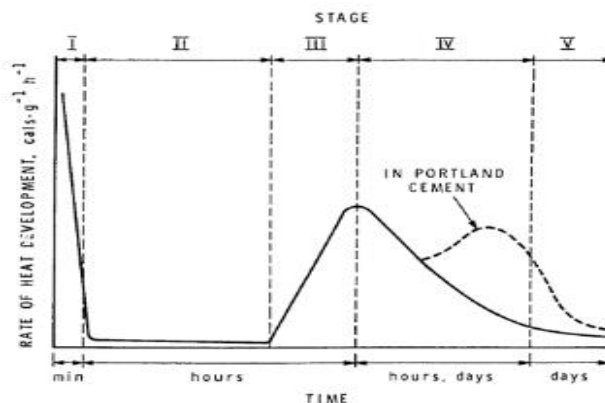
ลักษณะโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลีเมอร์นั้น แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและรับกำลังอัดของคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO<sub>2</sub>) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกริยาขั้นที่สองเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่า ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งจากปฏิกริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น

โครงสร้างไฮเดรชันเมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เกิดจาก แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ดังแสดงในสมการ (2.2) ถึง (2.3)



เมื่อทราบถึงการทำปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักโดยรวมแล้ว มีการตั้งสมมติฐานขึ้นมาว่า สารประกอบแต่ละตัวไม่ได้ทำปฏิกริยากันเอง (Independent Hydration-Le Chatelier)

พบว่าในเส้นกราฟแสดงการพัฒนาความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันคือการรวมความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบแต่ละตัวมารวมกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 อัตราการเกิดความร้อนในปูนซีเมนต์

ที่มา : Ramachandran V.S. and Feldman R.F., 1995

จากภาพประกอบ 4 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของความร้อนประมาณ 3 ครั้ง โดยสองครั้งแรกเป็นปฏิกิริยาของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ส่วนในครั้งที่สามเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  ที่ถูกหน่วงไม่ให้ไฮเดรตในช่วงแรกโดยยิปซั่ม และทราบกันดีว่าถึงแม้ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงแต่ก็จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา

แต่เมื่อมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องสารประกอบแต่ละตัวไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน พบว่า  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ต่างพยายามแย่ง Sulfate ions กันในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยทุกครั้ง  $C_3A$  ซึ่งทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า  $C_4AF$  จะแย่ง Sulfate ions ไปก่อน นอกจากนี้เมื่อศึกษาปริมาณการเกิดความร้อนของสารประกอบแต่ละตัวแยกจากกันเปรียบเทียบกับปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นของสารประกอบแต่ละตัวเมื่อในรูปของซีเมนต์ จะพบว่าได้ค่าไม่ตรงกันในบางตัวจะได้ค่ามากขึ้นและในบางตัวจะได้ค่าน้อยลง ดังตาราง 7

การพัฒนาโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น สารประกอบหลักทั้ง 4 จะเกิด CSH gel และ Ettringite อยู่รอบๆ ผิวเม็ดซีเมนต์ในช่วงแรกหรือช่วง Dormant Period เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสามารถทำให้เพสต์มีความเหลวและสามารถหล่อได้ เกิดขึ้นเป็นระยะเวลา 1-2 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดช่วง Dormant Period จะเริ่มเข้าสู่ช่วงก่อตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งทำให้ CSH ที่อยู่รอบๆ ผิวเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก เพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป จากนั้นเม็ดซีเมนต์จะเพิ่มมากขึ้นเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์และเกิดการยึดเกาะกัน ส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง อยู่ในช่วงก่อตัวสุดท้าย (Final Set)



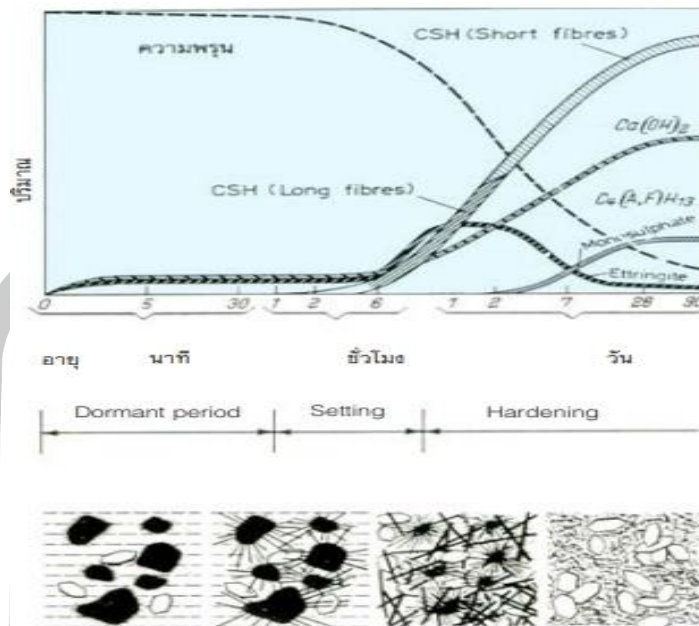
ภาพประกอบ 5 เป็นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ โดยขั้นตอนแรกจะเกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  (รูปเหลี่ยม) และ Ettringite (ลักษณะเป็นเส้นบาง) เป็นส่วนมาก ในช่วง Dormant Period เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้น CSH gel ที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายลักษณะยาว ก่อตัวและเพิ่มปริมาณมากขึ้น เข้าไปอุดในช่องความพรุนของซีเมนต์เพสต์ เมื่อการพัฒนาผ่านไป 24 ชั่วโมง Sulphate ions ถูกนำไปใช้หมด อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์จะเริ่มก่อตัวขึ้น และ Ettringite จะถูกเปลี่ยนเป็น Monosulphate ส่วน  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  ยังคงเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง สุดท้าย CSH ที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายเส้นใยจะทำหน้าที่เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ทำให้ความพรุนลดลงส่งผลให้กำลังเพิ่มมากขึ้น (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2556)

ตาราง 7 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบแต่ละตัวภายใต้สภาวะต่างกัน

Reaction	Heat of Hydration (J/g)	
	Pure Compound Measured	Cement Measured
$\text{C}_3\text{S} \rightarrow \text{CSH} + \text{CH}$	520	490
$\text{C}_2\text{S} \rightarrow \text{CSH} + \text{CH}$	260	225
$\text{C}_3\text{A}$		
$\text{C}_3\text{AH}_6$	900	-
Ettringite	1670	-
Monosulfo-aluminate	1150	1170
$\text{C}_4\text{AF}$		
Monosulfo-aluminate	-	380
Ettringite	730	-

ที่มา : Mindess S., 2001





ภาพประกอบ 5 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์  
ที่มา : ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2556

#### 2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในภายหลังต่อจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และน้ำ ในสมการ (2.2) และ (2.3) จะได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเมื่อรวมกับวัสดุปอซโซลานที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ดังในสมการ (2.4) และ (2.5)

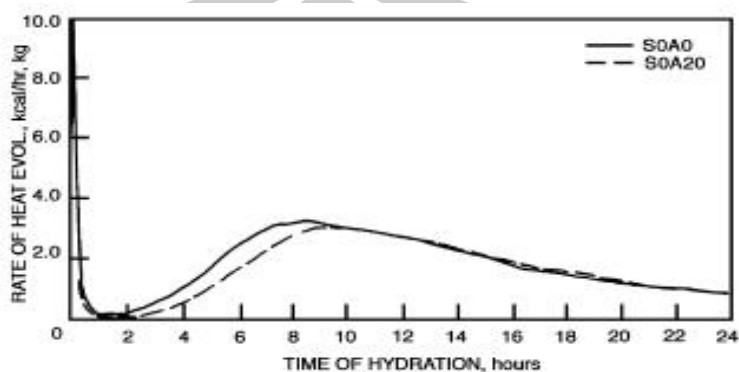


ค่า x, y และ z ในสมการ (2.3) และ (2.4) เป็นค่าที่แปรผันไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ซึ่งทั้งสองค่านี้จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเนื่องจากลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีช่องว่างน้อยลง

เมื่อทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นเป็นปฏิกิริยาที่รุนแรงและให้ความร้อนสูง แต่ในคอนกรีตผสมปอซโซลานจำพวก แก้วลอย หรือผงตะกรันเตาถลุงเหล็ก ที่วัสดุปอซโซลานเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในสัดส่วนมาก (ตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 50) ปริมาณปูนซีเมนต์ที่หายไปส่งผลให้ปฏิกิริยาน้อยลง ซึ่งเมื่อรวมกับปฏิกิริยาปอซโซลานที่ค่อนข้างช้า ส่งผลให้ซีเมนต์ผสมแก้วลอยเกิดไฮเดรชันต่ำในช่วงแรกและเกิดความร้อนที่ต่ำกว่าซีเมนต์ปกติ โดยในภาพประกอบ 6



ทำการเปรียบเทียบซีเมนต์ปกติและซีเมนต์ที่ทำการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 พบว่าอัตราการเกิดความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะต่ำและช้ากว่าคอนกรีตธรรมดาในช่วงเวลา 10 ชั่วโมงแรก



ภาพประกอบ 6 อิทธิพลของเถ้าลอยต่อการเกิดความร้อนในซีเมนต์

ที่มา : Langan et al., 2002

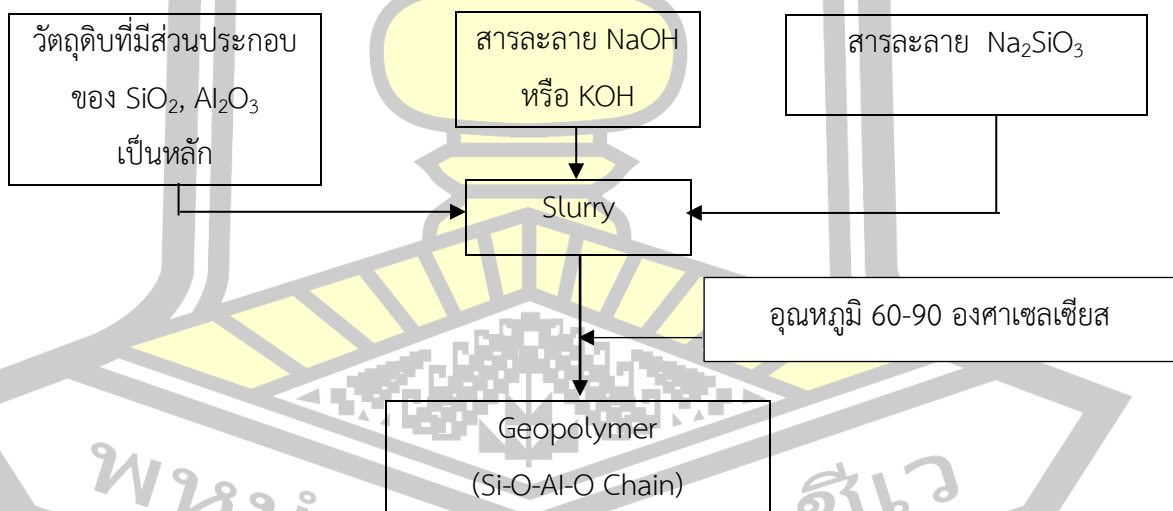
### 2.4.3 ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน

จีโอโพลิเมอร์เกิดจากกระบวนการปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งขั้นตอนการเกิดขั้นนั้นมีหลายขั้นตอนตั้งแต่ กระบวนการชะละลาย (Dissolution) เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Polymerization) ตัววัสดุประกอบกลายเป็นเจล (Gelation) จากนั้นจัดเรียงตัวใหม่ (Reorganization) และรวมตัวเกาะกลุ่ม (Polymerisation) ซึ่งสารที่จะก่อให้เกิดกระบวนการทั้งหมดได้จะต้องเป็นวัสดุสารประกอบ ซิลิกา และอะลูมินา จากนั้นอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่อยู่ในรูปแบบอสังฐาน จะทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ หรือสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะอธิบายกลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์ทั้ง 5 ตามขั้นตอนข้างต้น ดังนี้ (Duxson, 2007)

ขั้นตอนแรกชะละลาย (Dissolution) เมื่อนำวัสดุสารประกอบซิลิกา และอะลูมินา ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะทำให้อะลูมิโนซิลิเกตนั้นเกิดการชะละลายได้ อะลูมินต (Al) และซิลิเกต (Si) ขั้นตอนที่สองอยู่ในสภาวะสมดุลจำเพาะ (Equilibrium Speciation) การชะละลายตำแหน่งพื้นผิวของวัสดุปอซโซลาน ส่งผลให้อะลูมินตและซิลิเกตอยู่ในสภาวะปล่อยเป็นอิสระ อยู่ในรูปของโมโนเมอร์ กลายเป็นโครงสร้างซับซ้อนของซิลิเกต อะลูมินต และอะลูมิโนซิลิเกต เกิดขึ้นและอยู่ในสภาวะที่มีสภาวะสมดุลจำเพาะ จากนั้นน้ำที่เป็นส่วนเกินจะถูกปลดปล่อยระหว่างปฏิกิริยาเคมีและถูกขับออกจากเนื้อจีโอโพลิเมอร์ระหว่างการบ่มและช่วงที่อยู่ในสภาพแห้งตัว น้ำที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาจะอยู่ในโพรงขนาด

เล็กแต่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Nano Pore) ซึ่งมีผลดีต่อการทำงานและไม่ได้มีส่วนสำคัญในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เพียงแค่เป็นส่วนผสมในการทำปฏิกิริยาในระหว่างการผสม ขั้นตอนที่สามารถกลายเป็นเจล (Gelation) การชะละลายของอะลูมิเนียมซิลิเกตในรูปของอสัญฐานจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าความเป็นด่างสูง จนทำให้สารละลายอะลูมิเนียมซิลิเกตอิ่มตัวอย่างมาก (Supersaturated Aluminosilicate Solution) อยู่ในรูปของเจล (Gel) ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) โดยมีน้ำเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่โดยการควบแน่น จากนั้นปฏิกิริยานี้จะปล่อยน้ำที่สะสมอยู่ในช่วงขั้นตอนสถานะสมดุลจำเพาะออกมา น้ำอีกส่วนหนึ่งจะเหลือในโพรงของเจล ซึ่งโครงสร้างเจลมีสองเฟส ประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกตและน้ำ ขั้นตอนที่สองเริ่มจัดเรียงโครงสร้างใหม่ (Reorganization) หลังจากอะลูมิเนียมซิลิเกตกลายเป็นเจล ปฏิกิริยายังคงเกิดขึ้นเรื่อยๆ และทำการจัดเรียงตัวและโครงสร้างใหม่ ขั้นตอนสุดท้ายก่อตัวแบบลูกโซ่และแข็งตัว (Polymerization and Hardening) มีการเชื่อมโยงโครงข่ายมากขึ้น ทำให้เกิดโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกต 3 มิติ

ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เกิดเนื่องจากจีโอโพลิเมอร์ ที่มีโครงสร้างหลักเกิดจากองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และออกซิเจน ภายใต้สภาวะความเป็นด่างสูง ทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็น Polymer Chain โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการสังเคราะห์ที่อธิบายตามภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization)

ที่มา : ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2556

วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะโครงสร้างลูกโซ่ที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากวัสดุปอลิซิลานามีอัตราส่วนของ Si:Al ที่แตกต่างกันออกไปในสารตั้งต้น ดังนั้นโครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์ได้ดังสมการ (2.1) (สำเร็จ รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม, 2553)

## 2.5 ไฮบริดจีโอโพลิเมอร์

ไฮบริดจีโอโพลิเมอร์เป็นการคิดค้นนวัตกรรมใหม่เกิดจากการใช้วัสดุตั้งต้นที่เป็นวัสดุพอลิโซลันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเข้าด้วยกันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีทางกายภาพและทางกลให้ดีขึ้น ในปัจจุบันวัสดุพอลิโซลันจากเถ้าชีวมวลมีองค์ประกอบทางเคมีไม่สมบูรณ์เทียบเท่าเถ้าถ่านหิน จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงหรือแทนที่ด้วยวัสดุบางอย่างที่ช่วยให้เถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบทางเคมีที่ดีขึ้น เช่น อะลูมิเนียมเนื่องจากอะลูมิเนียมมีส่วนประกอบของอะลูมินาเมื่อนำวัสดุสองชนิดรวมเข้าด้วยกัน ทำให้วัสดุพอลิโซลันมีองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไป แต่ไม่เพียงเท่านั้นจีโอโพลิเมอร์ยังมีความจำเป็นต้องใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ ซึ่งนั่นก็คือ สารเร่งปฏิกิริยา (Activator) หรือสารละลายด่างอัลคาไลน์นั่นเอง เมื่อวัสดุพอลิโซลันทำปฏิกิริยากับสารละลายแล้วยังต้องใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูง จากกระบวนการบ่มวิธีต่างๆ เช่น การบ่มไอน้ำความดันต่ำ การบ่มไอน้ำความดันสูง การบ่มที่อุณหภูมิสูง และการบ่มไมโครเวฟ เป็นต้น นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างอัลคาไลน์แล้วมีระยะเวลาในการก่อตัวที่เร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทำงานต่ำ เมื่อรวมกันแล้วจีโอโพลิเมอร์จึงไม่เหมาะสมกับการปฏิบัติงานจริง จึงนิยมใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปมากกว่า การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงคิดค้นหาวิธีการให้พลังงานความร้อนจากธรรมชาติ ซึ่งนั่นก็คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดจาก ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ซึ่งจะทำให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่วนหนึ่งเพื่อก่อให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นแต่อาจไม่สูงนักแต่ก็สามารถทดแทนได้ และเมื่อนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าชานอ้อยยังสามารถทำให้ส่วนผสมมีองค์ประกอบทางเคมีในทางที่ดีขึ้น ในด้านความสามารถในการทำงานทำการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษหรือ Superplasticizer ในส่วนผสม การศึกษาที่ผ่านมา Pangdaeng et al., (2014) แทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-15 ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าและใช้วิธีการบ่มน้ำแทนการบ่มร้อนจากตู้อบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดโดยการหลีกเลี่ยงในการใช้พลังงานความร้อนจากตู้อบเพื่อประหยัดพลังงาน

### 2.5.1 ความสามารถในการทำงานได้

ความสามารถในการทำงานได้มีค่าจำกัดคือผลรวมของพลังงานหรือกำลังที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคที่ก่อให้เกิดความอัดแน่นของคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ โดยความสามารถในการทำงานจะนำมาประยุกต์ เพราะกำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันหรือถูกกระทบโดยตรงกับช่วงว่างที่อยู่ในคอนกรีต ดังนั้นการที่จะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากที่สุด

เท่าที่จะเป็น โดยทำให้คอนกรีตหรือมอร์ตาร์สดมีความสามารถในการทำงานได้เพียงพอเพื่อให้คอนกรีตหรือมอร์ตาร์สามารถอัดแน่นได้ดีเพื่อใช้ในงานที่เหมาะสม ตามตาราง 8 นอกจากนี้ยังมีอีก 2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานได้ คือ เวลาและอุณหภูมิ เมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์จะแข็งตัวตามเวลา เพราะน้ำผสมบางส่วนถูกดูดซับไปโดยมวลรวม บางส่วนระเหยไป โดยเมื่อยังถูกแสงแดดหรือลมเช่นเดียวกัน และอีกบางส่วนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากสูญเสียความสามารถในการทำงานได้นี้เรียกว่า Slump Loss ซึ่งแปรผันตรงกับ ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดปูนซีเมนต์ อุณหภูมิและความสามารถในการทำงานเริ่มต้น (ชัชวาลย์ เศรษฐบุต, 2556) และนอกจากนี้ยังมีพลังงานในตัวคอนกรีตที่มีผลต่อความสามารถในการทำงาน คือ ความเครียด (Yield stress) และความหนืด (Plastic viscosity) โดยเมื่อความเครียดเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง และความหนืดที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 60-80 Pa.s (Laskar, 2009) โดยความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตหรือค่ายุบตัวมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการไหลแผ่

ตาราง 8 ค่าความสามารถในการทำงานได้สำหรับงานก่อสร้างชนิดต่าง ๆ เมื่อใช้เครื่องสั่นสะเทือน

ชนิดงานก่อสร้าง	ค่าการยุบตัว (ซม.)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
ฐานราก	7.5	5
แผ่นพื้น คาน ผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10	5
เสา ตอม่อ	12.5	5
คานคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังบาง ๆ	15	5

ที่มา : มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท 101, 2561

## 2.6 สารละลายต่างอัลคาไลน์

### 2.6.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ชะล้าง เปลี่ยนวัสดุที่มีสารประกอบของอะลูมินา และซิลิเกตให้กลายเป็นสารสังเคราะห์อัลคาไลน์อะลูมิเนต และซิลิเกต ปลดปล่อยออกเป็นอิสระอยู่ในรูปของสารโมโนเมอร์ อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) สารทั้ง 2 ชนิดมีสภาพความเป็นด่างสูง โดยสารไฮดรอกไซด์ที่นิยมมากกว่าคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากราคา

ไม่สูงมาก หาง่ายตามท้องตลาด และทำให้จีโอโพลิเมอร์มีคุณภาพที่ดี ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้กันประมาณ 5-20 โมลาร์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553)

### 2.6.2 สารประกอบซิลิเกต

สารประกอบซิลิเกตนิยมใช้เป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งมีหลายประเภท เมื่อทำการออกเป็นส่วนผสม ถ้าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$  สูงจะทำให้กำลังรับแรงดี แต่ความสามารถในการทำงานจะต่ำลง แก้ปัญหาโดยการเติมน้ำเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีขึ้น โซเดียมซิลิเกตสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553)

### 2.6.3 ผลกระทบของสารละลายต่างอัลคาไลน์

สำเรียง และนิโรจน์ (2553) ศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 2.5 ของวัสดุตั้งต้นทั้งสองชนิด จากการศึกษาอัตราส่วน 3 ระดับ คือ 0.5 1.5 และ 2.5 และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 ระดับ คือ 10 15 20 โมลาร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดจากความเข้มข้น 15 โมลาร์ และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อยมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดจากความเข้มข้น 10 โมลาร์ (สำเรียง รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม, 2553)

อนุวัต และสมหมาย (2559) ศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 ระดับ คือ 0.75 1.00 และ 1.25 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.00 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 ระดับ คือ 7.5 10 และ 12.5 โมลาร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อยมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อสารตั้งต้นเท่ากับ 0.5 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด จากการศึกษาอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อสารตั้งต้น 3 ระดับ คือ 0.4 0.5 และ 0.6 โดยเติมน้ำร้อยละ 3 ของสารตั้งต้น (อนุวัต โยธากุล และสมหมาย ศรีสุธรรม, 2559)

ปิยะวัตร และสุทธีวัชร (2560) ศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม พบว่าอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อสารตั้งต้นที่มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 0.5 จากการศึกษาสารอัลคาไลน์ต่อสารตั้งต้น 2 ระดับ คือ 0.5 และ 0.55 โดยเติมน้ำร้อยละ 5 ของสารตั้งต้น (ปิยะวัตร เกษร และสุทธีวัชร ฤทธิวัชร, 2560)

## 2.7 สารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Superplasticizer) ได้มีการค้นพบโดย W.R.Grace ในปี 1938 สารลดน้ำพิเศษมีพฤติกรรมคล้ายกับสารลดน้ำธรรมดา



คือ ช่วยลดแรงระหว่างอนุภาคซีเมนต์ในพาสต์สดและจะต่างจากสารลดน้ำทั่วไปคือ จะไม่มีผลต่อแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำ ดังนั้นจึงสามารถใช้สารลดน้ำพิเศษได้ในปริมาณสูง โดยไม่ทำให้เกิดฟองอากาศมาก (ACI Committee, 1989) สารลดน้ำพิเศษที่นิยมใช้กันอยู่มี 2 ชนิด ดังนี้

### 2.7.1 Sulphonate Naphthalene Formaldehyde Condensates

ผลิตจากกรรมวิธีทางเคมี โดยใช้ Naphthalene ( $C_{10}H_8$ ) ผ่านกระบวนการซัลโฟเนชัน (Sulphonation) ด้วยกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) จะได้สารประกอบของแนพทาลีนกับกรดซัลโฟนิก และนำสารมาทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde,  $CH_2O$ ) ได้สารประกอบชนิดใหม่ แล้วนำไปแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) แต่เนื่องจากสารประกอบชนิดใหม่มีสภาพเป็นกรด ดังนั้นกลุ่มกรดซัลโฟนิก จึงถูกทำให้เป็นกลาง (Neutralization) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้สารประกอบทางเคมีของเกลือ Sulphonate Naphthalene Formaldehyde Condensates

### 2.7.2 Sulphonate Melamine Formaldehyde Condensates

เป็นสารเคมีที่ได้จากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้เมลามีน (Melamine,  $C_3H_6N_6$ ) ทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ ได้สารประกอบของไตรเมทิลอลเมลามีน (Trimethylol Melamine) แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมไบซัลไฟต์ (Sodium Bisulphite,  $NaHSO_3$ ) ได้สารประกอบชนิดใหม่แล้วนำไปแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ได้สารประกอบเกลือ Sulphonate Melamine Formaldehyde Condensates

ประโยชน์ของสารลดน้ำพิเศษ คือ การผลิตคอนกรีตไหล (Flowing Concrete) ที่มีค่าการยุบตัวสูงถึง 200 มิลลิเมตร หรือมากกว่านี้ ใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) ซึ่งทำให้ลดปริมาณน้ำได้ถึงร้อยละ 30 ในขณะที่ยังรักษาความสามารถทำงานได้เช่นเดิม และยังใช้เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งลดได้น้อยที่สุดในช่วงร้อยละ 10-20 ในขณะที่ยังคงรักษาความสามารถในการทำงานได้และกำลังรับแรงอัดคอนกรีตเท่าเดิมได้ (วิทิต พิทยธรรธร และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2538) แต่สำหรับจีโอโพลิเมอร์จากการศึกษาสารลดน้ำพิเศษเพื่อนำมาเป็นส่วนผสมในการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้และกำลังรับแรงอัด พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ (Nematollahi and Sanjayan, 2014) นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษลงในจีโอโพลิเมอร์เพื่อแก้ไขปัญหาความสามารถในการทำงานได้ของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม ที่ใช้น้ำเพียงอย่างเดียวมีค่าสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้สารลดน้ำพิเศษและการใช้น้ำและสารลดน้ำพิเศษร่วมกันให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด (Salami et al., 2016)

## 2.8 การบ่มและอุณหภูมิของคอนกรีต

### 2.8.1 ความหมายและวัตถุประสงค์การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) เป็นชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตให้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการสามารถทำได้หลังจากคอนกรีตที่มีการก่อตัวแล้วจากนั้นให้น้ำเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นต่อไป หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ ป้องกันการสูญเสียความชื้น และรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ เพื่อให้คอนกรีตมีการพัฒนาคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางกลที่ดีขึ้น เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มแรกโดยการรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสมและลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึงการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ซึ่งสามารถทำให้คุณภาพของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มแรกเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่อาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาวได้ คอนกรีตจำเป็นต้องได้รับการบ่มทันทีหลังจากเสร็จสิ้นการแต่งผิวหน้าและคอนกรีตที่เริ่มก่อตัวแล้ว และควรบ่มต่อไปจนกระทั่งคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดความต้องการ สิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงเพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตได้รับความเสียหายในขณะทำการบ่ม ได้แก่ การสั่นสะเทือน การกระทบ การรับน้ำหนักที่มากจนเกินไป และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างมากในระยะเวลานั้นๆ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้นๆ ของคอนกรีต (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2551)

### 2.8.2 วิธีการบ่มคอนกรีต

1) การบ่มที่อุณหภูมิปกติ สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

ก) การบ่มคอนกรีตโดยการเพิ่มน้ำ วิธีการนี้เป็นการเพิ่มน้ำหรือความชื้นให้ผิวหน้าคอนกรีตโดยตรงในระยะแรกที่คอนกรีตเริ่มก่อตัวเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่กำหนด น้ำที่ใช้บ่มควรมีคุณภาพสอดคล้องกับมาตรฐาน ไม่มีสารเจือปนที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือทำให้ผิวหน้าคอนกรีตเปลี่ยนสี และควรหลีกเลี่ยงการใช้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10 องศาเซลเซียสในการบ่มคอนกรีต เพราะจะทำให้ผิวคอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดการแตกร้าวได้ (Thermal Shock) การบ่มแบบนี้สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

- การชังน้ำหรือการแช่น้ำ เป็นการทำทาบก้นน้ำเพื่อไม่ให้น้ำไหลออกได้ เหมาะกับโครงสร้างที่เป็นงานทางระดับ เช่น พื้นหรือถนน เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำทาบก้นน้ำอาจใช้เป็น

ดินเหนียว หรืออิฐก็ได้ ข้อควรระวังสำหรับวิธีนี้ คือ ต้องระวังทำนบกั้นน้ำพังเนื่องจากจะทำให้น้ำรั่วไหลออกจนทำให้ผิวหน้าคอนกรีตแห้ง และไม่ควรรู้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10 องศาเซลเซียสในการบ่ม

- การฉีบน้ำหรือรดน้ำ เป็นฉีตให้ให้ผิวคอนกรีตน้ำอยู่เสมอ วิธีนี้สามารถใช้กับงานคอนกรีต ทั้งในแนวตั้ง แนวระดับ หรือแนวเอียง ข้อควรระวังสำหรับวิธีนี้ คือ น้ำอาจชะผิวคอนกรีตที่ยังมีการก่อตัวที่ไม่สมบูรณ์ ก่อให้เกิดความเสียหายได้ และไม่ควรรู้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10 องศาเซลเซียสในการบ่ม

- การใช้วัสดุน้ำขึ้นคลุม เป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างมาก เนื่องจากสะดวก ประหยัดและสามารถใช้กับงานทั้งแนวระดับ แนวตั้งและแนวเอียง วัสดุที่ใช้คลุมได้แก่ ผ้าใบ กระจสบหรือวัสดุอื่นที่สามารถเก็บน้ำได้ ข้อควรระวังสำหรับวิธีนี้ คือ วัสดุที่ใช้บ่ม ต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายต่อผิวคอนกรีต และไม่ควรรู้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10 องศาเซลเซียสในการบ่ม

ข) การบ่มคอนกรีตโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำ วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตมิให้เล็ดลอดออกสู่ภายนอกโดยการใช้วัสดุปิดทับ (Sealing Materials) ทำหน้าที่เป็นแผ่นคลุม หรือเป็นฟิล์มเคลือบผิวคอนกรีต เพื่อลดการสูญเสียน้ำจากการระเหย การบ่มแบบนี้สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

- การใช้สารเคลือบคอนกรีตหรือน้ำยา วิธีการใช้ฉีตพ่นคลุมผิวคอนกรีต ภายหลังจากการแต่งผิวคอนกรีตเสร็จและผิวคอนกรีตเริ่มแห้ง โดยควรฉีตพ่นซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง ข้อควรระวัง คือ หลีกเลี่ยงผิวคอนกรีตที่ยังมีการเย็นน้ำอยู่ หรือยังคงมีการระเหยของน้ำที่ผิวมากเกินไป และไม่ควรรู้น้ำที่เย็นลงบนเหล็กเสริม หรือรอยต่อของโครงสร้าง

- การใช้พลาสติกคลุม วิธีการวางแผ่นพลาสติกบนผิวคอนกรีตให้เรียบและเหลื่อมกันเพื่อผนึกด้วยเทป ข้อควรระวัง ต้องวางไม่ให้มีรอยย่น เพื่อลดรอยต่อ และควรตรวจสอบการรั่วของแผ่นพลาสติกที่ใช้คลุม

- การใช้กระดาษกันซึมได้คลุม คล้ายกับวิธีใช้พลาสติกคลุมแต่เปลี่ยนวัสดุเป็นกระดาษกันน้ำซึม

- การใช้แบบหล่อ วิธีการคือใช้กับกรณีแบบหล่อไม้ เนื่องจากจะต้องพ่นน้ำใส่แบบหล่อเพื่อให้ไม้มีความชื้นอยู่ตลอดเวลาและยึดระยะเวลาการถอดแบบหล่อออกไป ข้อควรระวัง คือ ระยะเวลาในการถอดแบบหล่อควรพิจารณาจากผลการทดสอบกำลังของคอนกรีตโดยตรง

2) การบ่มที่อุณหภูมิสูง สามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คาน และแผ่นพื้น เป็นต้น ข้อดีคือ สามารถผลิตได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดแบบหล่อเนื่องจากสามารถถอดได้เร็วและคอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทนต่อการเคลื่อนย้ายและใช้งานได้ดี การบ่มวิธีนี้ควรคำนึงถึงปัจจัยดังนี้ เช่น ระยะเวลาการบ่ม อัตราการเร่งอุณหภูมิ



อุณหภูมิสูงสุดของการบ่ม ระยะเวลาการคงอุณหภูมิสูงสุดไว้ และอัตราการลดอุณหภูมิ เป็นต้น วิธีการบ่มที่อุณหภูมิสูง มีดังนี้

ก) การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing) อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังอัดและกำลังอัดสูงสุดที่ต้องการ นอกจากอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้บ่มแล้ว สิ่งสำคัญก็คือ ระยะเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ระยะเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดจริง และช่วงเวลาลดอุณหภูมิลงสู่ช่วงอุณหภูมิปกติ ในหลายๆ โอกาส การใช้บ่มด้วยไอน้ำนี้เพื่อให้ได้ความปลอดภัยต่อการถอดแบบและการขนย้ายเท่านั้น จากนั้นก็สามารถบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นตามปกติได้ ดังนั้นคอนกรีตที่บ่มด้วยไอน้ำความดันต่ำจะมีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิต่ำ

ข) การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง (High Pressure Steam Curing) เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส ซึ่งการบ่มที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส มีข้อดี ดังนี้ เช่น สามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 ชั่วโมง เนื่องจากคอนกรีตมีกำลังสูงทัดเทียมการบ่มปกติที่อายุ 28 วัน มีการหดตัวและการล้าลดลงมาก ทนเกลือซัลเฟตได้ดีขึ้น กำจัด Efflorescence และมีความชื้นต่ำภายหลังการบ่ม ในทางปฏิบัติ การบ่มด้วยวิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายสูงและใช้ได้กับคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น

ค) การบ่มด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Curing) เป็นการบ่มที่มีความคล้ายคลึงกับการบ่ม 2 วิธีข้างต้น เพียงแต่ไม่มีไอน้ำที่เป็นตัวให้ความชื้นแก่คอนกรีต การบ่มวิธีนี้เป็น การบ่มตั้งแต่คอนกรีตยังไม่เริ่มก่อตัว จากนั้นบ่มตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด แล้วนำมาบ่มในอากาศต่อ การบ่มนี้ช่วยเพิ่มกำลังให้สูงขึ้นในช่วงอายุต้นของคอนกรีตได้ดีขึ้น

ง) การบ่มตู้ไมโครเวฟ (Microwave Curing) เป็นการบ่มจากทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ ซึ่งเป็นการเกิดความร้อนขึ้นภายในตัววัสดุเอง โดยในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นเป็นการอาศัยการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Conduction) และกลไกชนิดการสลับทำให้เกิดการหมุนสองขั้ว (Dipolar Rotation) โดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างโมเลกุล และคลื่นไมโครเวฟสามารถก่อให้เกิดความร้อนทั่วตัววัสดุภายใน ให้ความร้อนมีการกระจายสม่ำเสมอทั่วเนื้อวัสดุ ในขณะที่การให้ความร้อนด้วยวิธีอื่นจะเกิดความร้อนที่ผิววัสดุก่อน ซึ่งอาจทำให้ผิววัสดุเกิดความเสียหายได้ (บุรฉัตร ฉัตรวิระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ, 2554)

## 2.9 งานวิจัยที่ผ่านมา

### 2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย

วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ (2551) ศึกษากำลังรับแรงอัดและอัตราการซึมผ่านน้ำคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยจากโรงงาน 3 แหล่ง ที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) แตกต่างกัน ก่อนจะทำการใช้งานมีการปรับปรุงความละเอียดโดยการบดให้มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ  $2.5 \pm 0.5$  โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดปริมาณวัสดุประสานของส่วนผสมเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.6 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตสด ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าขานอ้อยระหว่างร้อยละ 9.1 ถึง 19.4 มีผลกระทบไม่มากต่อกำลังอัดและการซึมผ่านของคอนกรีต

นาทปิยะ แก้วศรีบุตร (2557) ศึกษาสมบัติเถ้าขานอ้อยเพื่อใช้ในการงานคอนกรีต ทำการศึกษาเถ้าขานอ้อย จาก 3 แหล่ง คือ จังหวัดสระบุรี จังหวัดลพบุรี และจังหวัดราชบุรี โดยนำเถ้าขานอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดละเอียดจนได้ปริมาณข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ  $5 \pm 2$   $15 \pm 2$   $25 \pm 2$  และ  $35 \pm 2$  โดยน้ำหนัก มาทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี ค่าความต้องการน้ำ กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ การหดตัวของมอร์ตาร์ และความคงตัวของเพสต์ โดยใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า ค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขานอ้อยมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และลดลงเมื่อเถ้าขานอ้อยมีความละเอียดมากขึ้น ความละเอียดที่มากขึ้นของเถ้าขานอ้อยทำให้ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์สูงขึ้น โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ  $5 \pm 2$  ให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 60 และ 90 วัน ในด้านระยะเวลาในการก่อตัวต้นอยู่ในช่วง 93-155 นาที และการก่อตัวสุดท้ายอยู่ในช่วง 175-270 นาที ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 ที่กำหนดระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

### 2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย

Singh และคณะ (2000) ศึกษาโดยรวมว่าเถ้าขานอ้อยสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ทำการทดลองนำเถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมมอร์ตาร์ ร้อยละ 0-30 ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าเมื่อทำการแทนที่เถ้าขานอ้อยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเมื่อ

เปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่ได้ถูกแทนที่ อย่างไรก็ตามพบว่าผลการแทนที่เถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ไม่ได้ถูกแทนที่ ในอายุ 28 วัน และพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยสามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรด และลดการซึมผ่านของน้ำได้ ในด้านระยะการก่อตัวโดยมีมอร์ตาร์ควบคุมพบว่าผลการแทนที่เถ้าชานอ้อยร้อยละ 10-20 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในส่วนการแทนที่เถ้าชานอ้อยร้อยละ 30 มีระยะก่อตัวต้น 821 นาที และระยะก่อตัวสุดท้าย 1,080 นาที

เพ็ญชาย เวียงใต้ (2553) ศึกษาความคงทนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด โดยแยกเถ้าชานอ้อยเป็น 2 ประเภท คือ เผาซ้ำ และดั้งเดิมจากแหล่ง โดยเผาเถ้าชานอ้อยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นหาความละเอียดของเถ้าชานอ้อยที่มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐาน 325 แล้วแบ่งความละเอียดออกเป็น 2 กลุ่มเช่นกัน คือ ความละเอียดอยู่ในช่วงร้อยละ 30-5 และความละเอียดน้อยกว่าร้อยละ 5 ของเถ้าชานอ้อยทั้ง 2 ประเภท จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อหลอมมอร์ตาร์สำหรับศึกษากำลังรับแรงอัด การสูญเสียกำลังและการขยายตัว เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในกรดซัลฟูริก ผลการทดสอบพบว่าผลการเผาและการบดเถ้าชานอ้อยช่วยปรับปรุงคุณภาพของเถ้าชานอ้อยให้ดียิ่งขึ้น ในส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัด การต้านทานการสูญเสียกำลังอัด การต้านทานการสูญเสียน้ำหนักและการต้านทานการขยายตัวได้ดีที่สุด ในด้านระยะก่อตัวพบว่าทุกส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีค่าระยะก่อตัวต้น 97-210 นาที และระยะก่อตัวสุดท้าย 135-234 นาที

สำเร็จ รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม (2553) ศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ (RA) และเถ้าชานอ้อย (BA) โดยใช้อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 1.5 และ 2.5 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ เพื่อทำการศึกษากำลังรับแรงอัด ผลทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบ มีกำลังรับแรงอัดสูงเมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เถ้าแกลบเท่ากับ 15 โมลาร์ ส่วนจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อย มีกำลังรับแรงอัดสูงเมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยเท่ากับ 10 โมลาร์

วรายศ วิชูธีรคันต์ (2556) ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อกำลังอัดของสารประกอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าตะกอนน้ำประปา โดยสารตั้งต้นทั้งสองชนิดถูกนำมาอบแห้ง แล้วบดละเอียดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตะกอนน้ำประปาที่เผาด้วยอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง การแทนที่ใน

ถ้าชานอ้อยไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงกว่า การแทนที่ร้อยละอื่นๆ และยังพบอีกว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากถ้าชานอ้อยผสม ตะกอนน้ำประปาเผามีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อ โซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1.00 และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ และ อุณหภูมิของการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส แต่การใช้ตะกอนน้ำประปาส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง (ร้อยละ 0-73) และมอร์ตาร์มีการหดตัวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ ถ้าชานอ้อยเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว

สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ (2548) ศึกษาผลกระทบของถ้าชานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยการนำถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ร้อยละ 22.75 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ระยะเวลาในการก่อตัว การก่อตัวสุดท้าย ค่าความชื้นเหลือปกติ การขยายตัว การหดตัวเมื่อแห้งและการต้านทานกรดซัลฟูริก กระทำที่อายุของมอร์ตาร์เท่ากับ 3 7 28 และ 90 วัน จากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของ มอร์ตาร์มีค่าลดลงจากรีมาณการแทนที่ของถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้นที่อายุมอร์ตาร์ 3 และ 7 วัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปที่อายุคอนกรีต 28 และ 90 วันมีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุก อัตราส่วน ยกเว้นอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงและสูงกว่ามอร์ตาร์ ควบคุมในทุกอายุการบ่ม ความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย การขยายตัว การหดตัวเมื่อแห้งมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของถ้าชานอ้อย ส่วนการต้านทานกรดซัลฟูริก พิจารณาจากการสูญเสียของน้ำหนัก และค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์หลังแช่กรดซัลฟูริกพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยถ้าชานอ้อยทำให้ต้านทานกรดซัลฟูริกดีขึ้น การสูญเสียน้ำหนักและ กำลังรับแรงอัดน้อยลงตามปริมาณการแทนที่ในทุกระยะเวลา

### 2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮบริดซีเมนต์

Pradip Nath และ Prabir Kumar Sarker (2015) ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถ แข็งตัวในอุณหภูมิปกติได้ เนื่องจากการศึกษาส่วนมากเน้นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ต้องผ่านการบ่ม ร้อนในการพัฒนากำลังรับแรงอัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้าชานอ้อยที่มี ส่วนผสมปูนซีเมนต์เพื่อเร่งการบ่ม จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแทนการใช้ความร้อน โดยเก็บไว้ในห้อง (อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส) จนกระทั่งถึงอายุคอนกรีตที่ทำการทดสอบ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ เพียงร้อยละ 5 ของวัสดุตั้งต้น ช่วยลดระยะเวลาในการก่อตัวลงแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และลด ความสามารถในการทำงานลงเล็กน้อย แต่กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุคอนกรีตที่

28 วัน โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์พบว่าปริมาณแคลเซียมที่เติมไปด้วย Aluminosilicate Gel ซึ่งเกิดจากการเติม OPC

Hamdy K. Shehab et al. (2016) ศึกษาส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์บางส่วนหรือทั้งหมด โดยปรับอัตราปริมาณวัสดุตั้งต้น อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น และอัตราส่วนการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ พบว่ากำลังรับแรงอัดในทุกส่วนผสมมีค่าสูงสุดโดยการแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 50 ในด้านปริมาณวัสดุตั้งต้นแบ่งออกเป็น 2 อัตราส่วนคือ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุตั้งต้นกำลังรับแรงอัดอาจจะไม่ได้สูงขึ้นเสมอไป เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนสารละลาย 0.55 และ ปริมาณ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรอัตราส่วนสารละลาย 0.45 พบว่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนที่มีปริมาณวัสดุตั้งต้นน้อยมีค่าต่ำกว่าในการแทนที่ร้อยละ 0 แต่เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยกลับพบว่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณวัสดุตั้งต้นมากในทุกช่วงของการแทนที่ อาจสรุปได้ว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น 0.55 อย่างมีนัยสำคัญ

Mahya Askarian et al. (2018) ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์แบบผสมผสาน โดยส่วนหนึ่งใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 7.5 ของสารตั้งต้น เป็นตัวกระตุ้นหลัก ทำการทดสอบ ความสามารถในการทำงาน ระยะเวลาในการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมคอนกรีต พบว่าการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจีโอโพลิเมอร์ลดความสามารถในการทำงานและระยะเวลาในการก่อตัว แต่เพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงสุดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันมีค่า 26.7 เมกะปาสคาล เป็นกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มีค่า 33.4 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังได้ทดสอบส่วนผสมคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าร้อยละของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นที่คอนกรีตอายุ 28 วัน เนื่องจากการกระตุ้นจากสารละลายอัลคาไลน์ลดลงจากร้อยละ 82.5 เป็นร้อยละ 24.4 ตามผลของการเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 60

#### 2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบ่มและสารผสมเพิ่ม

ปริญญา จินดาประเสริฐ และสันติสุข เชื้อมชัยตระกูล (2539) ทำการศึกษาคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ เพื่อหาความชื้นเหลือปกติ เวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และ กำลังรับแรงอัด โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 0 10 20 และ 30 รวมทั้งไมโครซิลิการ้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และเติมสารลดน้ำพิเศษต่อวัสดุประสานร้อยละ 0 1 2 3 และ 4 โดยน้ำหนัก เพื่อควบคุมอัตราการไหลแผ่คงที่ร้อยละ



110±5 จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 3 การผสมเถ้าลอยจะทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการผสมไมโครซิลิกาทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ทั้งนี้มาจากสาเหตุที่วัสดุมีความละเอียดที่สูงขึ้น สำหรับด้านกำลังรับแรงอัดช่วงต้นมีค่าลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นในภายหลัง ส่วนการผสมไมโครซิลิกาจะทำให้กำลังรับแรงอัดทั้งระยะต้นและระยะปลายดีขึ้น

Pangdaeng et al. (2014) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเติมแต่งที่มีการบ่มแตกต่างกัน โดยที่เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น โดยศึกษาถึงเวลาและโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ การไหลแผ่ กำลังรับแรงอัด ความพรุนและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ วิธีการบ่มได้แบ่งออกเป็น วิธีการบ่มแบบไอน้ำและการบ่มอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมช่วยเพิ่มสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวเนื่องจากการก่อตัวของ CSH และ CASH เจล วิธีการบ่มยังมีผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมีนัยสำคัญ การบ่มด้วยไอน้ำช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและทำให้มีกำลังอัดสูง ส่วนการบ่มด้วยอุณหภูมิทำให้การรับแรงอัดเริ่มต้นสูง ในด้านความสามารถในการทำงานได้พบว่าทุกส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ร้อยละ 111-136) แต่ในด้านระยะก่อตัวมีเพียงการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐานโดยมีค่าระยะเวลาก่อตัวต้น 66 นาที และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย 82 นาที





## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุตั้งต้นได้ ทำการศึกษาเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำและตั้งเดิมเพื่อนำมาเป็นวัสดุตั้งต้น จากนั้นศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 0-15 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น 0.5 0.55 และ 0.6 โดยน้ำหนัก เมื่อได้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทำการบ่ม 2 วิธี คือ การบ่มอุณหภูมิและการบ่มน้ำเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติจีโอโพลิเมอร์ โดยทำการทดสอบความสามารถในการทำงานได้และกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ และระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าขานอ้อยผสมปูนซีเมนต์

#### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) เถ้าขานอ้อยตั้งเดิม (BA) บดละเอียดโดยใช้ระยะเวลาในการบด 6 ชั่วโมง ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5
- 2) เถ้าขานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำ (BR) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที บดละเอียดโดยใช้ระยะเวลาในการบด 6 ชั่วโมง ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5

##### 3.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่หนึ่ง (OPC) ตามมาตรฐานของ มอก. 15

##### 3.2.3 มวลรวมละเอียด ทราย ที่มีโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ในช่วง 2.70-2.80

##### 3.2.4 น้ำกลั่นใช้สำหรับเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ความเข้มข้น 10 โมลาร์ นำมาละลายกับน้ำกลั่นทิ้งให้เย็นตัวอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

##### 3.2.6 สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

3.2.7 สารลดน้ำพิเศษ ซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizer) Type G ประเภท PolyCarboxylate

### 3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.3.1 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด 100 ตัน (Universal Testing Machine)
- 3.3.2 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส (Electric Oven)
- 3.3.6 เครื่องบดแบบตกระทอบ (Grinding Machine)
- 3.3.8 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Weighing Machine)
- 3.3.9 โต๊ะเขย่าไล่ฟองอากาศ (Vibrating Table)
- 3.3.10 เครื่องผสมมอร์ต้าร์ (Mortar Mixer Machine)
- 3.3.11 ตู้อบไฟฟ้า (Electric Oven)
- 3.3.12 ตะแกรงร่อน (Sieve) สำหรับร่อนทรายขนาดเบอร์ 4
- 3.3.14 บีกเกอร์ขนาดความจุ 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 3.3.16 แบบหล่อมอร์ต้าร์ทองเหลืองขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร

### 3.4 คำอธิบายสัญลักษณ์ในงานวิจัย

คำอธิบายสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

BA หมายถึง เถ้าขานอ้อยตั้งเดิมบดละเอียดค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่า ร้อยละ 5

RB หมายถึง เถ้าขานอ้อยเผาซ้ำบดละเอียดค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่า ร้อยละ 5

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

A/B หมายถึง อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน

SP หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ Type G ประเภท PolyCarboxylate

TC หมายถึง การบ่มร้อน อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

WC หมายถึง การบ่มน้ำ

ตัวอย่างชื่อของอัตราส่วนผสม มีดังต่อไปนี้

10C55O หมายถึง การแทนที่วัสดุประสานด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยใช้วัสดุตั้งต้นเป็นเถ้าขานอ้อยตั้งเดิม

5C50R หมายถึง การแทนที่วัสดุประสานด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 โดยใช้วัสดุตั้งต้นเป็นเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ

RWSP3 หมายถึง สัดส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ จากนั้นเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ อย่างละร้อยละ 3 ของวัสดุประสาน

12TW หมายถึง สัดส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดด้วยกรรมวิธีการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มน้ำ

### 3.5 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.5.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

- 1) การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์  
ทดสอบโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) ในการรายงานผลของออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์
- 2) การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์  
ทดสอบความถ่วงจำเพาะของวัสดุตั้งต้น ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188-95 Standard Test for Density of Hydraulic Cement โดยใช้ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask) ใช้หลักการแทนที่ของเหลวด้วยสารซีเมนต์ที่จะทำการทดสอบ เพื่อหาปริมาตรของสารซีเมนต์ โดยน้ำมันก๊าดใช้กับปูนซีเมนต์และน้ำใช้กับเถ้าชานอ้อย คำนวณหาค่าความหนาแน่นของสารซีเมนต์จากน้ำหนักของสารซีเมนต์หารด้วยปริมาตรสารซีเมนต์ ค่าความถ่วงจำเพาะของสารซีเมนต์เท่ากับค่าความหนาแน่นของสารซีเมนต์หารด้วยค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- 3) ทดสอบความละเอียดของเถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์  
ความละเอียดของวัสดุตั้งต้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204 Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus ด้วยวิธีการร่อนน้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 325 หาร้อยละน้ำหนักค้างบนตะแกรงโดยน้ำหนัก จากนั้นหาพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วย ตารางเซนติเมตรต่อสารซีเมนต์ 1 กรัม ด้วยเครื่องแอร์เพอร์มีบิลิตีของเบลน (Air Permeability Apparatus)
- 4) ทดสอบการกระจายขนาดคละและค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย  
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136-95 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

### 3.5.2 การทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์

#### 1) ทดสอบความสามารถในการทำงานได้

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230/C230M Standard Specification for Flow table For Use in Test of Hydraulic Cement โดยการนำจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมแล้วเทลงในแบบหล่อรูปกรวยคว่ำตัดที่มีความสูง 127 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน 171 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านล่าง 254 มิลลิเมตร แบ่งใส่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็น 2 ชั้น ทำการกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ตั้งแบบหล่อบริเวณกลางแท่นทดสอบการไหลแผ่ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 762 มิลลิเมตร จากนั้นแบบหล่อออกแล้วปล่อยให้แท่นทดสอบตกกระทบจากความสูง 12.7 มิลลิเมตร ทั้งหมด 25 ครั้ง ภายในเวลา 15 วินาทีซึ่งค่าการไหลแผ่คิดเป็นร้อยละของการขยายตัวของจีโอโพลิเมอร์

#### 2) ทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars หล่อตัวอย่างในแบบหล่อมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร โดยแบ่งจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จแล้วเป็น 2 ชั้น เท่าๆกัน ทำการกระทุ้งชั้นละ 16 ครั้ง เพื่อไล่ฟองอากาศทำการสั่นด้วยโต๊ะสั่นเป็นเวลา 10 วินาที ปิดแบบหล่อด้านบนด้วยกระจกใสแผ่นเรียบ แล้วห่อด้วยไวนิลเพื่อป้องกันความชื้น ทั้งตัวอย่างให้ก่อตัวในอากาศก่อนนำเข้าตูอบตามเวลาที่กำหนดสำหรับการบ่มด้วยตูอบ ส่วนในการบ่มน้ำเมื่อมอร์ตาร์แข็งตัวก็นำไปบ่มในน้ำแล้วนำมาทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด

#### 3) ทดสอบหาระยะเวลาก่อตัว

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle เพื่อทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบไวแคต

### 3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากวัสดุตั้งต้นที่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ จีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมและจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำ มีรายละเอียดดังนี้

### 3.6.1 จีโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม วิธีการบ่มร้อน

ทำการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS:NH) เท่ากับ 1.00 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 หลังจากการผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จะเก็บตัวอย่างไว้ในอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุทดสอบ สัดส่วนผสมดังตาราง 9 ซึ่งได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 0-15
- 2) อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน (A/B) เท่ากับ 0.5-0.6 โดยน้ำหนัก

ตาราง 9 สัดส่วนผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม วิธีการบ่มร้อน

ที่	สัดส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่ OPC	A/B	ส่วนผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (กก./ม. <sup>3</sup> )					การบ่ม
				BA	OPC	Sand	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
1	0C500	0	0.5	700	0	1925	175	175	TC
2	0C550	0	0.55	700	0	1925	192.5	192.5	TC
3	0C600	0	0.6	700	0	1925	210	210	TC
4	5C500	5	0.5	665	35	1925	175	175	TC
5	5C550	5	0.55	665	35	1925	192.5	192.5	TC
6	5C600	5	0.6	665	35	1925	210	210	TC
7	10C500	10	0.5	630	70	1925	175	175	TC
8	10C550	10	0.55	630	70	1925	192.5	192.5	TC
9	10C600	10	0.6	630	70	1925	210	210	TC
10	15C500	15	0.5	595	105	1925	175	175	TC
11	15C550	15	0.55	595	105	1925	192.5	192.5	TC
12	15C600	15	0.6	595	105	1925	210	210	TC

### 3.6.2 จีโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ วิธีการบ่มร้อน

ทำการเผาเถ้าขานอ้อยซ้ำด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS:NH) เท่ากับ 1.00 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 หลังจากการผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะเก็บตัวอย่างไว้ในอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุทดสอบ สัดส่วนผสมดังตาราง 10 ซึ่งได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าขานอ้อย ร้อยละ 0-15
- 2) อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน (A/B) เท่ากับ 0.5-0.6 โดยน้ำหนัก

ตาราง 10 สัดส่วนผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ วิธีการบ่มร้อน

ที่	สัดส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่ OPC	A/B	ส่วนผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (กก./ม. <sup>3</sup> )					การบ่ม
				BR	OPC	Sand	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
13	0C50R	0	0.5	700	0	1925	175	175	TC
14	0C55R	0	0.55	700	0	1925	192.5	192.5	TC
15	0C60R	0	0.6	700	0	1925	210	210	TC
16	5C50R	5	0.5	665	35	1925	175	175	TC
17	5C55R	5	0.55	665	35	1925	192.5	192.5	TC
18	5C60R	5	0.6	665	35	1925	210	210	TC
19	10C50R	10	0.5	630	70	1925	175	175	TC
20	10C55R	10	0.55	630	70	1925	192.5	192.5	TC
21	10C60R	10	0.6	630	70	1925	210	210	TC
22	15C50R	15	0.5	595	105	1925	175	175	TC
23	15C55R	15	0.55	595	105	1925	192.5	192.5	TC
24	15C60R	15	0.6	595	105	1925	210	210	TC

### 3.6.3 จีโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ วิธีการบ่มน้ำ

ทำการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS:NH) เท่ากับ 1.00 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 หลังจากการผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จะทำการปิดแผ่นพลาสติกใสเพื่อควบคุมความชื้น จากนั้นแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อหลังจาก 24



ชั่วโมง นำตัวอย่างบ่มในน้ำต่อจนครบอายุการทดสอบ สัดส่วนผสมดังตาราง 11 ซึ่งได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ ดังนี้

1) อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าขานอ้อย ร้อยละ 0-15

2) อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน (A/B) เท่ากับ 0.5-0.6 โดยน้ำหนัก

ตาราง 11 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ วิธีการบ่มน้ำ

ที่	สัดส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่ OPC	A/B	ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (กก./ม. <sup>3</sup> )					การบ่ม
				BA/BR	OPC	Sand	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
25	0C500	0	0.5	700	0	1925	175	175	WC
26	0C550	0	0.55	700	0	1925	192.5	192.5	WC
27	0C600	0	0.6	700	0	1925	210	210	WC
28	5C500	5	0.5	665	35	1925	175	175	WC
29	5C550	5	0.55	665	35	1925	192.5	192.5	WC
30	5C600	5	0.6	665	35	1925	210	210	WC
31	10C500	10	0.5	630	70	1925	175	175	WC
32	10C550	10	0.55	630	70	1925	192.5	192.5	WC
33	10C600	10	0.6	630	70	1925	210	210	WC
34	15C500	15	0.5	595	105	1925	175	175	WC
35	15C550	15	0.55	595	105	1925	192.5	192.5	WC
36	15C600	15	0.6	595	105	1925	210	210	WC
37	0C50R	0	0.5	700	0	1925	175	175	WC
38	0C55R	0	0.55	700	0	1925	192.5	192.5	WC
39	0C60R	0	0.6	700	0	1925	210	210	WC
40	5C50R	5	0.5	665	35	1925	175	175	WC
41	5C55R	5	0.55	665	35	1925	192.5	192.5	WC
42	5C60R	5	0.6	665	35	1925	210	210	WC
43	10C50R	10	0.5	630	70	1925	175	175	WC
44	10C55R	10	0.55	630	70	1925	192.5	192.5	WC
45	10C60R	10	0.6	630	70	1925	210	210	WC
46	15C50R	15	0.5	595	105	1925	175	175	WC
47	15C55R	15	0.55	595	105	1925	192.5	192.5	WC
48	15C60R	15	0.6	595	105	1925	210	210	WC

3.6.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์เมื่อเติมสารผสมเพิ่ม

ใช้น้ำและสารลดน้ำพิเศษ เติมลงไปในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ร้อยละ 3 และ 5 โดยเลือกอัตราส่วนที่ได้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 90 วัน อันดับที่ 1 จากจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชาน อ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ จากนั้นทำการทดสอบระยะเวลาก่อตัวและทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยการบ่มทั้ง 2 วิธี ดังตาราง 12 จนกว่าจะครบอายุการทดสอบ

ตาราง 12 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อทดสอบผลของสารผสมเพิ่ม

ที่	สัดส่วนผสม	A/B	ชนิดแก้ว ชานอ้อย	น้ำ (ร้อยละ)	สารลดน้ำพิเศษ (ร้อยละ)	การบ่ม
49	OW3	0.55	ดั้งเดิม	3	0	TC และ WC
50	OW5	0.55	ดั้งเดิม	5	0	TC และ WC
51	OSP3	0.55	ดั้งเดิม	0	3	TC และ WC
52	OSP5	0.55	ดั้งเดิม	0	5	TC และ WC
53	OWSP3	0.55	ดั้งเดิม	3	3	TC และ WC
54	OWSP5	0.55	ดั้งเดิม	5	5	TC และ WC
55	RW3	0.50	เผาซ้ำ	3	0	TC และ WC
56	RW5	0.50	เผาซ้ำ	5	0	TC และ WC
57	RSP3	0.50	เผาซ้ำ	0	3	TC และ WC
58	RSP5	0.50	เผาซ้ำ	0	5	TC และ WC
59	RWSP3	0.50	เผาซ้ำ	3	3	TC และ WC
60	RWSP5	0.50	เผาซ้ำ	5	5	TC และ WC

### 3.6.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดจากกรรมวิธีการบ่ม

ทำการเปลี่ยนแปลงกรรมวิธีการบ่ม โดยใช้อัตราส่วนที่ได้กำลังรับแรงอัดสูงที่อายุ 28 วัน ที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.5.4 ทำการลดระยะเวลาในการบ่มอุณหภูมิลงที่ 6 12 18 24 และ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการบ่มน้ำจนครบอายุการทดลอง ตามตาราง 13

ตาราง 13 สัดส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เพื่อทดสอบผลของกรรมวิธีการบ่ม

ที่	สัดส่วนผสม	อันดับกำลังรับแรงอัด	ระยะเวลาการบ่มอุณหภูมิ (ชั่วโมง)
61	6TW	1	6
62	12TW	1	12
63	18TW	1	18
64	24TW	1	24
65	48TW	1	48

### 3.7 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์

#### 3.7.1 การเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด ความสามารถในการทำงานได้ สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) เตรียมอุปกรณ์และทำความสะอาดที่ใช้ในการผสม
- 2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ก่อนทำการผสมตัวอย่างอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
- 3) ชั่งตวงวัสดุตั้งต้น ทราบ สารเคมี ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้
- 4) ผสมวัสดุตั้งต้นทั้งสองชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกันในเครื่องผสมมอร์ตาร์
- 5) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที
- 6) เติมทรายในเครื่องผสมมอร์ตาร์ ผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที
- 7) เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตอย่างสุดท้ายแล้วทำส่วนผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 5 นาที

#### 3.7.2 การหล่อตัวอย่าง

ทำการหล่อแบบตัวอย่างทองเหลืองทรงลูกบาศก์ ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร

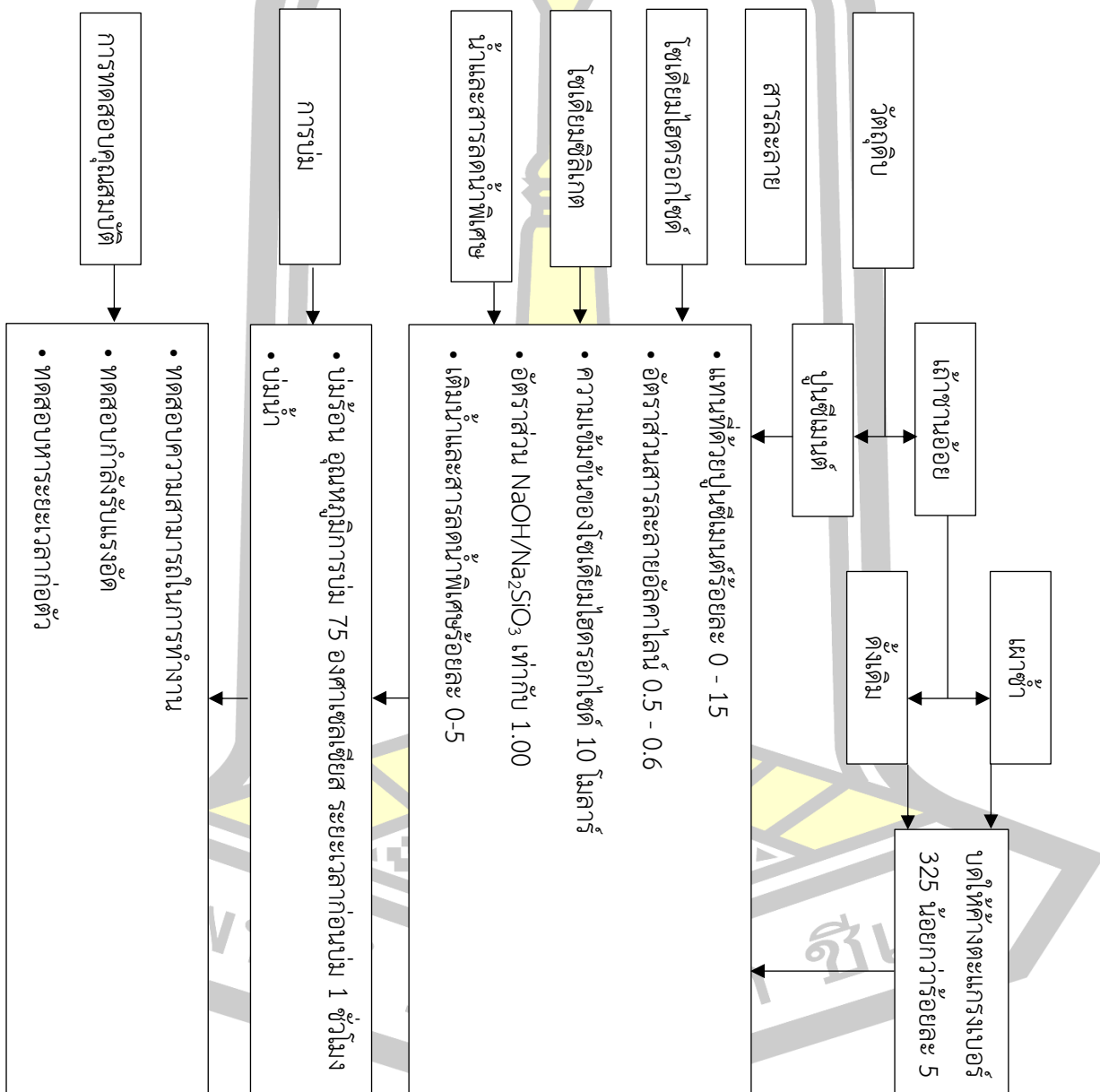
#### 3.7.3 การบ่มตัวอย่าง

การบ่มตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ทำการบ่ม 2 กรรมวิธี ดังนี้

- 1) การบ่มร้อน ทำการปิดแบบหล่อตัวอย่างด้านบนด้วยกระดาษใสเรียบ จากนั้นห่อด้วยไวนิลทั้งแบบหล่อเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นทำการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากตู้อบแล้วทำการบ่มในอากาศจนครบอายุการทดสอบ

2) การบ่มน้ำ ทำการปิดแบบหล่อตัวอย่างด้านบนด้วยไวนิลทั้งแบบหล่อเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ เมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบหล่อแล้วทำการบ่มต่อในน้ำจืดจนครบอายุการทดสอบ

### 3.8 แผนการดำเนินงานวิจัย



ภาพประกอบ 8 แผนการดำเนินงานวิจัย

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยผสมปูนซีเมนต์

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

##### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าขาน้อย และมวลรวมละเอียด

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าขาน้อยดั้งเดิม (OB) เถ้าขาน้อยเผาซ้ำ (RB) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) หาได้โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 ทราบตามมาตรฐาน ASTM C128 พบว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าขาน้อยดั้งเดิม เถ้าขาน้อยเผาซ้ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมวลรวมละเอียดเท่ากับ 2.34 2.52 3.15 และ 2.60 ตามลำดับ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136 มีค่าเท่ากับ 2.73 และทำการทดสอบหาขนาดและความละเอียดของเถ้าขาน้อยตามมาตรฐาน ASTM C204 หลังผ่านกระบวนการบดเพื่อเพิ่มความละเอียดแล้ว ทำการทดสอบเถ้าขาน้อยดั้งเดิมและเถ้าขาน้อยเผาซ้ำด้วยวิธีการร่อนน้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 325 พบว่ามีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 2 และ 1 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 14

ตาราง 14 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสความละเอียด	ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, $d_{50}$ (ไมโครเมตร)
OB	2.34	-	4	12.2
RB	2.52	-	2	12.1
OPC	3.15	-	-	14.6
Sand	2.60	2.73	-	-

#### 4.1.2 ผลการทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบของเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม เถ้าชานอ้อยเผาซ้ำและปูนซีเมนต์

โดยทำการทดสอบด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) สามารถระบุองค์ประกอบที่ปรากฏของวัสดุ ดังแสดงในตาราง 15 พบว่าเถ้าชานอ้อยทั้งสองแบบมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก และมีอยู่ในปริมาณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และความแตกต่างของเถ้าชานอ้อยเมื่อกระบวนการเผาซ้ำทำให้  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นและลดปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  ลง ทำให้เถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีค่า LOI เท่ากับ 11.2 และ 6.4 ตามลำดับ มาตรฐาน ASTM C618 ระบุว่าต้องมีค่า LOI น้อยกว่าร้อยละ 10 ทำให้มีเพียงเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำจัดอยู่ในหมวดวัสดุพอซโซลาน

ตาราง 15 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

Chemical Composition (%)	OB	RB	OPC	Requirement of ASTM C618 for natural pozzolan
$\text{SiO}_2$	68.25	75.50	20.9	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.83	3.62	4.8	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4.05	4.49	3.4	-
$\text{CaO}$	11.92	9.88	65.4	-
$\text{MgO}$	1.42	1.36	1.2	-
$\text{SO}_3$	0.15	0.15	2.7	< 4.0
LOI	11.20	6.39	0.9	< 10.0
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	89.00	84.00	-	> 70.0

ที่มา : ดัดแปลงจาก นันทชัย ชูศิลป์, 2552

#### 4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ได้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-15 และใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5-0.6 โดยใช้เถ้าชานอ้อย 2 ชนิด คือ เถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ ดังแสดงในตาราง 16

##### 4.2.1 ผลการแทนที่ปูนซีเมนต์

ค่าการไหลแผ่สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย ด้วยผลจากการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0-15 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์มีผลต่อค่าการไหลแผ่



อย่างมีนัยสำคัญจากการเพิ่มปริมาณการแทนที่ จากตาราง 16 แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ มีการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 4-40 ในอัตราส่วนที่มีการไหลแผ่สูงที่สุดร้อยละ 41 จากการไม่แทนที่ ปูนซีเมนต์และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 จะเห็นแนวโน้มว่า เมื่อมีการแทนที่ ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นและทำการลดสารละลายต่อวัสดุประสานลงส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง เช่นเดียวกัน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จะมีค่าการไหลแผ่ที่น้อยมาก เมื่อพิจารณาค่า การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมปูนซีเมนต์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารละลายต่อ วัสดุประสาน ดังแสดงในภาพประกอบ 9

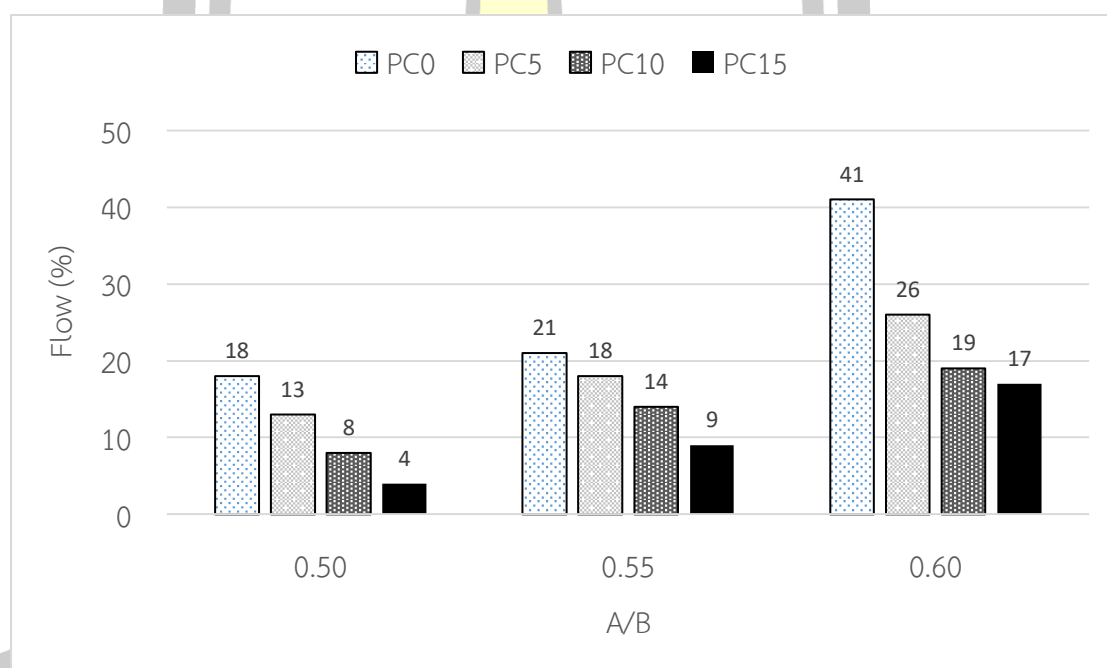
ตาราง 16 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิม

ลำดับ ที่	อัตราส่วนผสม	การแทนที่ปูนซีเมนต์ใน เก้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ)
1	0C500	0	0.50	1	18
2	0C550	0	0.55	1	21
3	0C600	0	0.60	1	41
4	5C500	5	0.50	1	13
5	5C550	5	0.55	1	18
6	5C600	5	0.60	1	26
7	10C500	10	0.50	1	8
8	10C550	10	0.55	1	14
9	10C600	10	0.60	1	19
10	15C500	15	0.50	1	4
11	15C550	15	0.55	1	9
12	15C600	15	0.60	1	17

หมายเหตุ : 10C550 หมายถึง ร้อยละการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 อัตราส่วนสารละลายต่อ วัสดุประสานเท่ากับ 0.55 จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิม

ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์มีความสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Pangdaeng et al., (2014) ซึ่งได้ศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเก้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ พบว่า เมื่อแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่ม ปริมาณสารละลายจะส่งผลให้ค่าการไหลแผ่มากขึ้นเนื่องจากเก้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้มี

ความต้องการน้ำเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากขึ้น (ร้อยละ 15) ในอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 มีค่าต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำที่รวดเร็ว น้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตจะถูกดึงออกมา และทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อสังเกตอัตราส่วน 0C600 พบว่าค่าอัตราการไหลแตกต่างจากอัตราส่วนอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากขั้นตอนผสมก่อนใส่โซเดียมซิลิเกตลักษณะเนื้อจีโอโพลิเมอร์มีสภาพน้ำซึ่งแตกต่างจากส่วนผสมอื่นที่มีลักษณะแห้งก่อนเติมโซเดียมซิลิเกต ทำให้ค่าอัตราการไหลแห้งของส่วนผสมทั้งหมดไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้โดยส่วนใหญ่ค่าอัตราการไหลแห้งของไฮบริดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีความผันผวนเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ทำให้ผลการทดสอบอาจมีความคาดเคลื่อน



ภาพประกอบ 9 ผลทดสอบการไหลแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วชานอ้อยดั้งเดิม PC ร้อยละ 0 5 10 15 A/B เท่ากับ 0.50 0.55 0.60

#### 4.2.2 ผลของการปรับปรุงคุณภาพถั่วชานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ

ค่าการไหลแห้งสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วชานอ้อยเผาซ้ำ ด้วยผลจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 15 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์มีผลต่อค่าการไหลแห้งอย่างมีนัยสำคัญจากการเพิ่มปริมาณการแทนที่ จากตาราง 17 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีการไหลแห้งอยู่

ในช่วงร้อยละ 7-71 ดังแสดงในภาพประกอบ 10 พบว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ทำให้ลดความสามารถในการทำงานได้ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารละลาย (A/B) สามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ เมื่อสังเกตอัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.50 และ 0.55 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อ A/B เท่ากับ 0.6 กลับพบว่าค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงพอในขั้นตอนผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อเติมโซเดียมซิลิเกตทำให้ลักษณะเนื้อจีโอโพลิเมอร์เหลวกว่าอัตราส่วน A/B 0.50 และ 0.55

ตาราง 17 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ

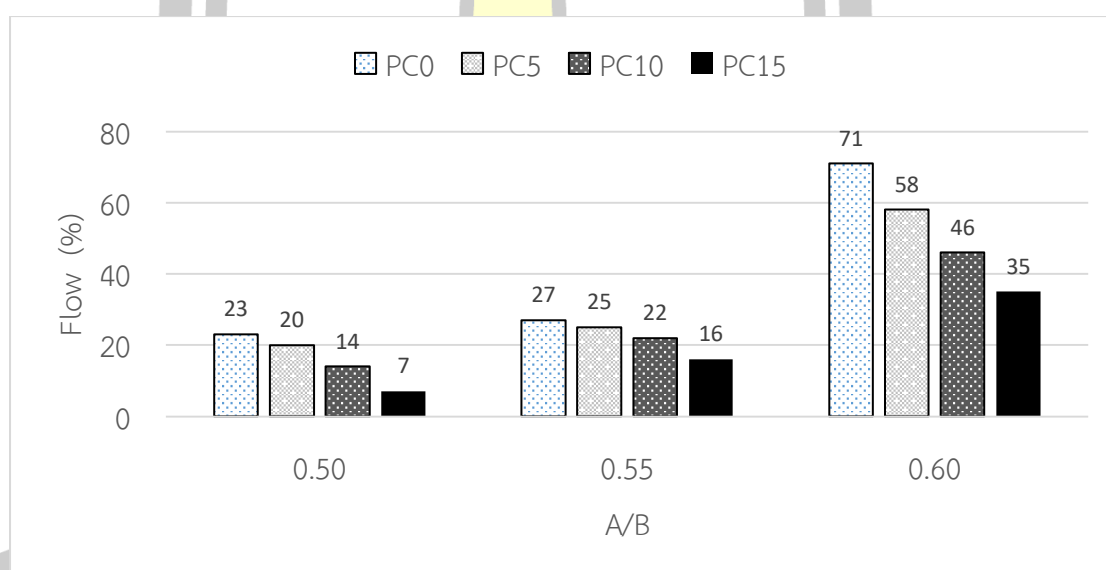
ลำดับที่	อัตราส่วนผสม	การแทนที่ปูนซีเมนต์ในเก้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ)
1	0C50R	0	0.50	1	23
2	0C55R	0	0.55	1	27
3	0C60R	0	0.60	1	71
4	5C50R	5	0.50	1	20
5	5C55R	5	0.55	1	25
6	5C60R	5	0.60	1	58
7	10C50R	10	0.50	1	14
8	10C55R	10	0.55	1	22
9	10C60R	10	0.60	1	46
10	15C50R	15	0.50	1	7
11	15C55R	15	0.55	1	16
12	15C60R	15	0.60	1	35

หมายเหตุ : 5C55R หมายถึง ร้อยละการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 จากเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ

เปรียบเทียบเก้าชานอ้อยดั้งเดิมและเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.60 และการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-15 ในตาราง 18 พบว่าเก้าชานอ้อยเผาซ้ำมีค่าการไหลแผ่มากกว่าเก้าชานอ้อยดั้งเดิม แต่ในอัตราส่วนสารละลายน้อย (A/B=0.5 และ 0.55) พบว่ามีความแตกต่างกันไม่มาก แต่แตกต่างกันในอัตราส่วนสารละลายมาก (A/B=0.6) และจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบในส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 เนื่องจากมีความต้องการน้ำมากที่สุด แสดงในภาพประกอบ 11 พบว่าเก้าชานอ้อยเผาซ้ำมีค่าการไหลแผ่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 75-105 เมื่อมีอัตราส่วนผสมเหมือนกัน

ตาราง 18 เปรียบเทียบการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิมและเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ

วัสดุ	A/B	การแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ / ค่าการไหลผ่าน (ร้อยละ)			
		0	5	10	15
OB	0.50	18	13	8	4
	0.55	21	18	14	9
	0.60	41	26	19	17
RB	0.50	23	20	14	7
	0.55	27	25	22	16
	0.60	71	58	46	35

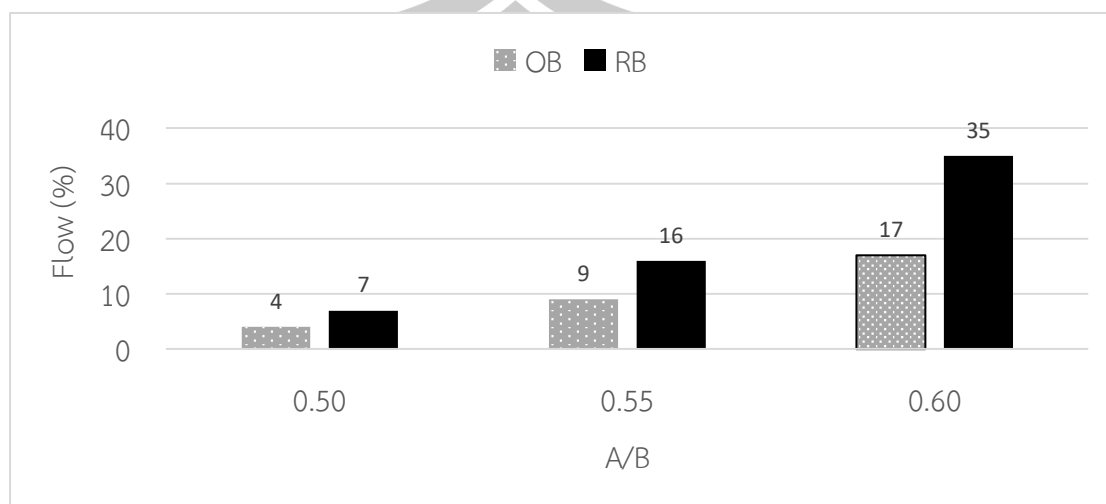


ภาพประกอบ 10 ผลทดสอบการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ

PC ร้อยละ 0 5 10 15 A/B เท่ากับ 0.50 0.55 0.60

ดังนั้น การปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้เก้าชานอ้อยที่ดั้งเดิม และเก้าชานอ้อยเผาซ้ำเป็นวัสดุตั้งต้น มีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเผาซ้ำเก้าชานอ้อยจะทำให้ช่องว่าง (Pore) หรือโพรง (Void) ของอนุภาคลดลง ส่งผลให้เก้าชานอ้อยมีความต้องการน้ำน้อยกว่าและมีขนาดเล็กกว่าเก้าชานอ้อย

ดั้งเดิม (เพ็ญชาย เวียงใต้ และเรืองรุชดี ชีระโรจน์, 2553) แก้วชานอ้อยเผาซ้ำจึงไม่ดึงน้ำที่อยู่ในสารละลายออกมา



ภาพประกอบ 11 ผลทดสอบการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อย ระหว่างแก้วชานอ้อยดั้งเดิม และแก้วชานอ้อยที่เผาซ้ำ เปรียบเทียบที่การแทนที่ PC ร้อยละ 15

#### 4.2.3 ผลของการเติมน้ำและสารผสมเพิ่ม

ในส่วนที่สอง นำส่วนผสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดดีที่สุด อายุ 28 วัน โดยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.50 ของแก้วชานอ้อยดั้งเดิมและแก้วชานอ้อยเผาซ้ำตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 15 จากนั้นเติมน้ำ สารลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนร้อยละ 3-5 และน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนอย่างละร้อยละ 3 และ 5 ของวัสดุประสาน ทดสอบความสามารถในการทำงาน ดังแสดงตาราง 19

##### 1. แก้วชานอ้อยดั้งเดิม

ค่าการไหลผ่านสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วชานอ้อยดั้งเดิม โดยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยใช้อัตราส่วนแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 15 จากนั้นเติมน้ำและสารผสมเพิ่ม มีการไหลผ่านอยู่ในช่วงร้อยละ 6-63 ในอัตราส่วนที่มีการไหลผ่านสูงสุดร้อยละ 63 จากการเติมน้ำร้อยละ 5 จากวัสดุประสาน จะเห็นแนวโน้มว่า อัตราการไหลผ่านเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากการเติมน้ำ และน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ ส่วนสารลดน้ำพิเศษเพียงอย่างเดียวส่งผลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการไหลผ่าน เห็นได้ชัดว่าสารลดน้ำพิเศษไม่สามารถปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้เมื่อเทียบกับการเติมน้ำเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพประกอบ 12

ตาราง 19 การไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำจากผลการเติมสารผสมเพิ่ม

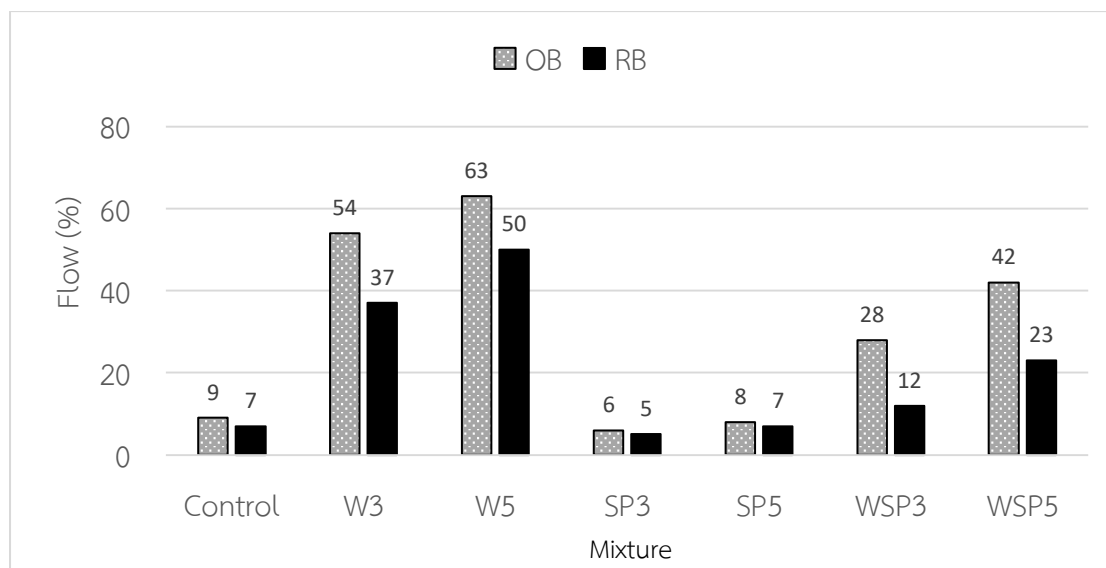
ลำดับที่	อัตราส่วนผสม	การแทนที่ปูนซีเมนต์ในเก้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	ค่าการไหลผ่าน (ร้อยละ)
1	3W-OB	15	0.55	1	54
2	5W-OB	15	0.55	1	63
3	3SP-OB	15	0.55	1	6
4	5SP-OB	15	0.55	1	8
5	3WSP-OB	15	0.55	1	28
6	5WSP-OB	15	0.55	1	42
7	3W-RB	15	0.50	1	37
8	5W-RB	15	0.50	1	50
9	3SP-RB	15	0.50	1	6
10	5SP-RB	15	0.50	1	7
11	3WSP-RB	15	0.50	1	12
12	5WSP-RB	15	0.50	1	23

หมายเหตุ : 3WSP-RB หมายถึง เติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษอย่างละร้อยละ 3 ของอัตราส่วนที่มีกำลังรับแรงอัดดีที่สุดอายุ 90 วัน จากเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ

## 2. เก้าชานอ้อยเผาซ้ำ

ค่าการไหลผ่านสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ ที่อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 โดยใช้อัตราส่วนแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 15 จากนั้นเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ มีการไหลผ่านอยู่ในช่วงร้อยละ 4-50 ในอัตราส่วนที่มีการไหลผ่านสูงที่สุดร้อยละ 50 จากการเติมน้ำร้อยละ 5 จากวัสดุประสาน พบว่าสารผสมเพิ่มส่งผลต่ออัตราการไหลผ่านเช่นเดียวกับเก้าชานอ้อยดั้งเดิม โดยสารลดน้ำพิเศษส่งผลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการไหลผ่าน โดยเมื่อสังเกตอัตราส่วนที่ไม่เติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ และเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 3 ต่อวัสดุประสาน มีค่าอัตราการไหลผ่านเท่ากับ 7 และ 5 ตามลำดับ จะเห็นว่าการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง เมื่อเติมน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษเข้าด้วยกัน ส่งผลให้ค่าการไหลผ่านมีทิศทางที่ตีขึ้นและส่งผลตีขึ้นเมื่อเติมน้ำเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพประกอบ 12





ภาพประกอบ 12 ผลทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาขานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำจากการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ

ดังนั้น ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาขานอ้อยจากการเติมสารผสมเพิ่ม พบว่าน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ และน้ำ ส่งผลดีต่อค่าการไหลแผ่ตามลำดับ ส่วนสารลดน้ำพิเศษส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการไหลแผ่ จากการเปรียบเทียบการเติมสารผสมเพิ่มในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 5-6) ในด้านการเปรียบเทียบระหว่างเถาขานอ้อยดั้งเดิมและเถาขานอ้อยเผาซ้ำไม่สามารถทำการเปรียบเทียบได้เนื่องจากอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานไม่เท่ากัน

#### 4.3 ผลทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยใช้วัสดุตั้งต้น 2 ชนิด ได้แก่ เถาขานอ้อยดั้งเดิม และเถาขานอ้อยเผาซ้ำ ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.50 ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำ สารลดน้ำพิเศษ และน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนร้อยละ 3 และ 5 ของวัสดุประสาน โดยผลการทดสอบแสดงในตาราง 20

##### 4.3.1 ผลของการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษในเถาขานอ้อยดั้งเดิม

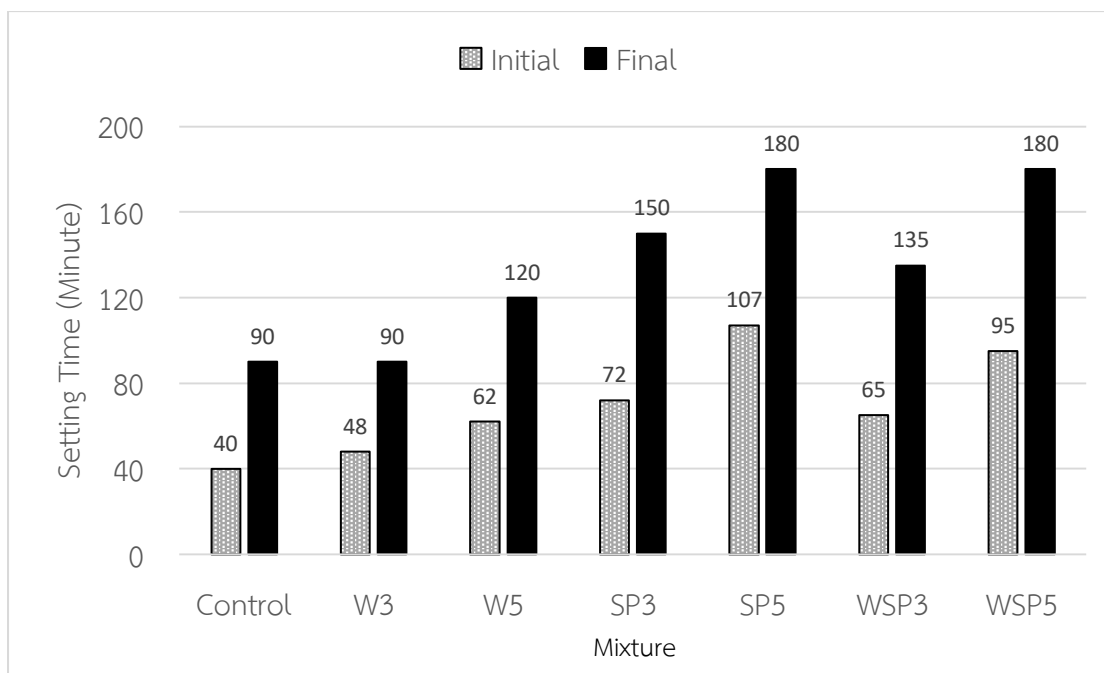
ระยะเวลาการก่อตัวสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาขานอ้อยดั้งเดิม โดยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ใช้อัตราส่วนแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 15 จากนั้นเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นในช่วง 40-107 นาที ในระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 107 และ 180 นาที จากการเติมสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 5 ของวัสดุประสาน จะเห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นจากการเติมสารลดน้ำพิเศษ มากกว่าการเติมน้ำหรือน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ เนื่องจากน้ำเป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดความร้อน และก่อ

ตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาจากการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษที่ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 5-6) พบว่าระยะเวลาการก่อตัวจะรวดเร็วขึ้นจากการเติมน้ำ น้ำผสมสารผสมเพิ่ม และสารลดน้ำพิเศษตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราการไหลแฝ สรุปรูปร่างน้ำสามารถเพิ่มอัตราการไหลแฝแต่เพิ่มระยะเวลาการก่อตัวเพียงเล็กน้อย และสารลดน้ำพิเศษเพิ่มอัตราการไหลแฝเพียงเล็กน้อยแต่เพิ่มระยะเวลาการก่อตัวได้มาก ดังภาพประกอบ 13

ตาราง 20 ผลทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ

ลำดับที่	อัตราส่วนผสม	การแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	ค่าการไหลแฝ (ร้อยละ)	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (นาที)
1	Control-OB	15	0.55	54	40	90
2	3W-OB	15	0.55	63	48	90
3	5W-OB	15	0.55	6	62	120
4	3SP-OB	15	0.55	8	72	150
5	5SP-OB	15	0.55	28	107	180
6	3WSP-OB	15	0.55	42	65	135
7	5WSP-OB	15	0.50	37	95	180
8	Control-RB	15	0.50	50	31	75
9	3W-RB	15	0.50	5	38	90
10	5W-RB	15	0.50	7	42	90
11	3SP-RB	15	0.50	12	53	120
12	5SP-RB	15	0.50	23	56	135
13	3WSP-RB	15	0.50	12	51	120
14	5WSP-RB	15	0.50	23	78	150

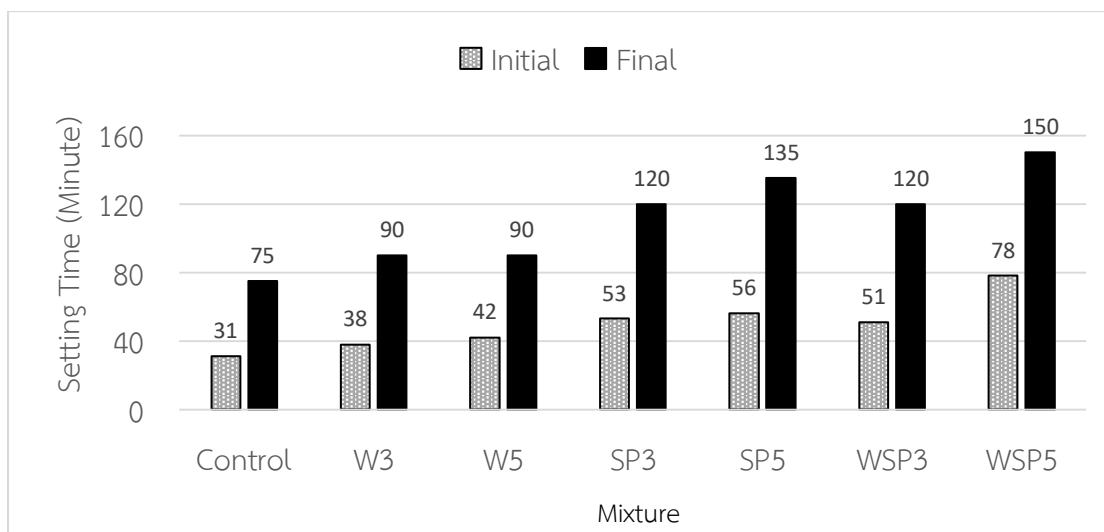
หมายเหตุ : 5WSP-OB หมายถึง เติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษอย่างละร้อยละ 5 ของอัตราส่วนที่มีกำลังรับแรงอัดดีที่สุดอายุ 90 วัน จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม



ภาพประกอบ 13 ผลทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมจากการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ

#### 4.3.2 ผลของการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษในเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ

ค่าระยะเวลาก่อตัวสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ โดยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 โดยใช้อัตราส่วนแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 15 จากนั้นเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ มีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นในช่วง 31-78 นาที ในระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 78 และ 150 นาที จากการเติมน้ำและสารผสมเพิ่มอย่างละร้อยละ 5 จากวัสดุประสาน ดังภาพประกอบ 14 พบว่าการเติมน้ำส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเร็วว่าการเติมน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ และสารลดน้ำพิเศษ ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาจากการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 5-6) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม แต่ในเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นนานที่สุดในอัตราส่วน WSP5 ซึ่งแตกต่างกับเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมที่มีอัตราส่วน SP5 เนื่องจากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมมีอัตราส่วนสารละลายมากทำให้การก่อตัวเริ่มต้นช้าจากการเติมสารลดน้ำพิเศษ



ภาพประกอบ 14 ผลทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำจากการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ

#### 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ได้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-15 และใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.60 โดยใช้เถ้าชานอ้อย 2 ชนิดคือ เถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ จากนั้นทำการบ่ม 2 แบบ คือ การบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และการบ่มน้ำ ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1.00 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนมวลรวมทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ดังแสดงในตาราง 21 และ 22 ส่วนที่สองนำอัตราส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 90 วัน ของเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ เติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 3-5 ของวัสดุประสานและเติมน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ อย่างละร้อยละ 3 และ 5 ของวัสดุประสาน และส่วนสุดท้ายนำส่วนผสมที่ดีที่สุดในส่วนที่สองมาเปลี่ยนแปลงวิธีการบ่ม คือ บ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 6 12 18 24 และ 48 ชั่วโมงจากนั้นนำไปบ่มน้ำจนกว่าจะครบอายุทดสอบ

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีการพัฒนาตามการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงขึ้น เมื่อปรับปรุงคุณภาพเถ้าชานอ้อยโดยการเผาซ้ำ พบว่าเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำส่งผลในทางที่ดีขึ้นของกำลังรับแรงอัด ด้านอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานของเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม และเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ มีแนวโน้มแตกต่างกัน อาจเนื่องจากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีความต้องการน้ำน้อยกว่าเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม ในขณะที่กรรมวิธีการบ่มพบว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิจะส่งผลให้มีกำลังสูงในระยะเวลา 3-7 วัน มากกว่าการบ่มน้ำแต่การบ่มน้ำสามารถพัฒนากำลังสูงขึ้น ตามระยะเวลาของการบ่ม ซึ่งกำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดของเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำและดั้งเดิมที่อายุ 90 วัน ของอัตราส่วนผสม

15C50RW และ 15C55OW เท่ากับ 529 และ 477 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 และกำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุดของเถ้าขาน้อยเผาซ้ำและตั้งเดิมที่อายุ 90 วัน ของอัตราส่วนผสม 0C60RW และ 0C60OW เท่ากับ 93 และ 110 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในอัตราส่วน 0C55OW 0C60OW 0C55RW และ 0C60RW ไม่สามารถทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 และ 7 วันได้ เนื่องจากปริมาณสารละลายมากทำให้จีโอโพลิเมอร์ไม่มีการก่อตัว

ตาราง 21 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยตั้งเดิมโดยกรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และการบ่มน้ำ

ชื่ออัตราส่วนผสม	อัตราส่วนผสม	การแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าขาน้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
					3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
1TC	0C50OT	0	0.50	1	42	52	96	196
2TC	0C55OT	0	0.55	1	43	55	87	202
3TC	0C60OT	0	0.60	1	15	23	52	140
4TC	5C50OT	5	0.50	1	171	183	206	268
5TC	5C55OT	5	0.55	1	140	160	170	264
6TC	5C60OT	5	0.60	1	138	145	169	216
7TC	10C50OT	10	0.50	1	315	333	347	364
8TC	10C55OT	10	0.55	1	205	255	292	335
9TC	10C60OT	10	0.60	1	194	226	240	257
10TC	15C50OT	15	0.50	1	242	266	294	319
11TC	15C55OT	15	0.55	1	292	310	347	381
12TC	15C60OT	15	0.60	1	307	335	339	342
1WC	0C50OW	0	0.50	1	12	56	121	205
2WC	0C55OW	0	0.55	1	-	-	44	151
3WC	0C60OW	0	0.60	1	-	-	24	110
4WC	5C50OW	5	0.50	1	91	183	190	219
5WC	5C55OW	5	0.55	1	46	94	130	168
6WC	5C60OW	5	0.60	1	27	105	113	120
7WC	10C50OW	10	0.50	1	114	211	270	335
8WC	10C55OW	10	0.55	1	78	174	268	357

ตาราง 21 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมโดยกรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และการบ่มน้ำ (ต่อ)

ชื่อ อัตรา ส่วน ผสม	อัตรา ส่วนผสม	การแทนที่ ปูนซีเมนต์ใน เถ้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
					3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
9WC	10C60OW	10	0.60	1	94	190	219	255
10WC	15C50OW	15	0.50	1	113	224	241	311
11WC	15C55OW	15	0.55	1	131	254	412	477
12WC	15C60OW	15	0.60	1	129	255	289	344

หมายเหตุ : - หมายถึง ก้อนตัวอย่างไม่มีการก่อตัว

TC หมายถึง เถ้าชานอ้อยดั้งเดิม วิธีการบ่มก้อนตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

WC หมายถึง เถ้าชานอ้อยดั้งเดิม วิธีการบ่มก้อนตัวอย่างด้วยวิธีบ่มน้ำ

ตาราง 22 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยที่เผาซ้ำโดยกรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ชื่อ สัดส่วน ผสม	อัตรา ส่วนผสม	การแทนที่ ปูนซีเมนต์ใน เถ้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
					3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
1TB	0C50RT	0	0.50	1	114	121	156	263
2TB	0C55RT	0	0.55	1	44	63	188	251
3TB	0C60RT	0	0.60	1	32	32	62	105
4TB	5C50RT	5	0.50	1	192	203	233	365
5TB	5C55RT	5	0.55	1	189	202	223	313
6TB	5C60RT	5	0.60	1	89	103	108	167
7TB	10C50RT	10	0.50	1	311	321	350	442
8TB	10C55RT	10	0.55	1	231	261	300	387
9TB	10C60RT	10	0.60	1	204	216	265	302
10TB	15C50RT	15	0.50	1	317	324	371	459
11TB	15C55RT	15	0.55	1	295	322	368	405
12TB	15C60RT	15	0.60	1	229	243	306	352
1WB	0C50RW	0	0.50	1	13	75	195	234



ตาราง 22 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยที่เผาซ้ำโดยกรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ (ต่อ)

ชื่อ สัดส่วน ผสม	อัตรา ส่วนผสม	การแทนที่ ปูนซีเมนต์ใน เถ้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
					3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
2WB	0C55RW	0	0.55	1	-	-	53	206
3WB	0C60RW	0	0.60	1	-	-	38	93
4WB	5C50RW	5	0.50	1	93	180	280	304
5WB	5C55RW	5	0.55	1	73	95	244	248
6WB	5C60RW	5	0.60	1	38	90	114	117
7WB	10C50RW	10	0.50	1	124	230	353	472
8WB	10C55RW	10	0.55	1	145	183	414	432
9WB	10C60RW	10	0.60	1	52	131	204	250
10WB	15C50RW	15	0.50	1	137	243	415	529
11WB	15C55RW	15	0.55	1	148	254	449	499
12WB	15C60RW	15	0.60	1	115	238	319	438

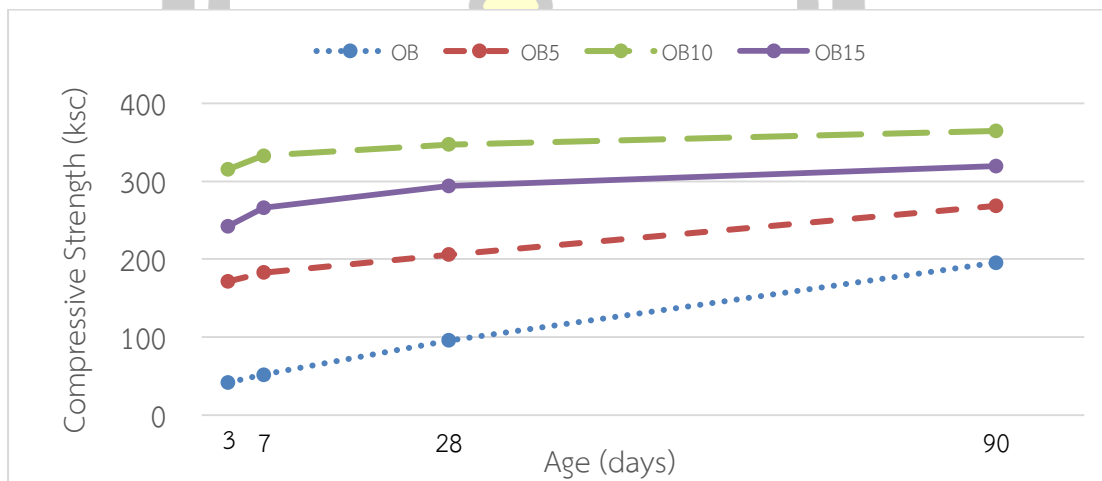
หมายเหตุ : TB หมายถึง เถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ วิธีการบ่มก่อนตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส  
WB หมายถึง เถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ วิธีการบ่มก่อนตัวอย่างด้วยวิธีบ่มน้ำ

#### 4.4.1 ผลการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม

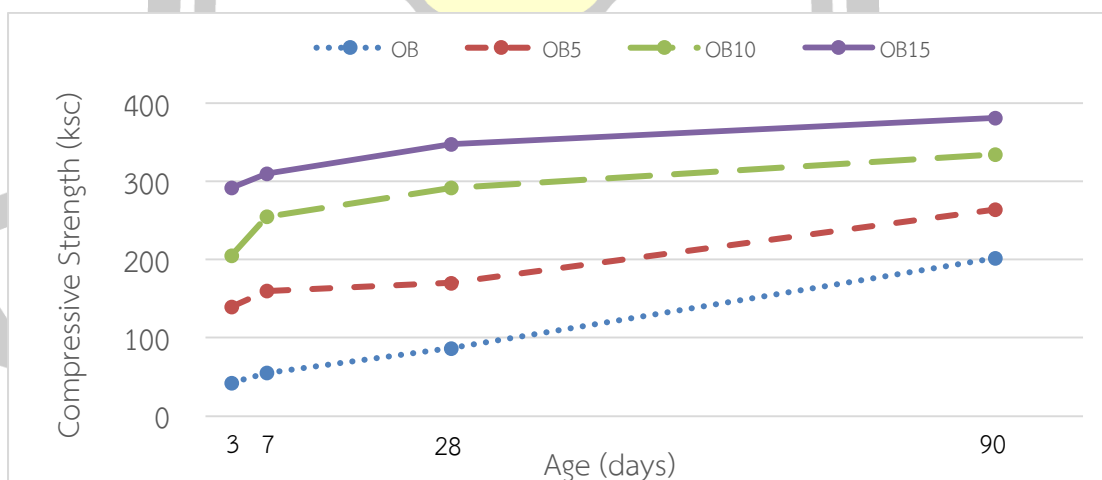
##### 1. กรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ

แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-15 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.60 โดยน้ำหนัก จากการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าเมื่อแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นตัวอย่าง 15C50OT จากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ในอัตราส่วนสารละลายเท่ากัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากน้ำในสารละลายไม่เพียงพอต่อการปฏิกิริยาได้ โดยการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์มากขึ้นทำให้มีความต้องการน้ำสูงขึ้น และต้องการอัตราส่วนสารละลายที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ตัวอย่างที่ได้กำลังรับแรงอัดมากที่สุดที่อายุ 90 วัน ได้แก่ 15C55OT เท่ากับ 381 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบการพัฒนา กำลังรับแรงอัด จากส่วนผสม A/B ตามอายุทดสอบ

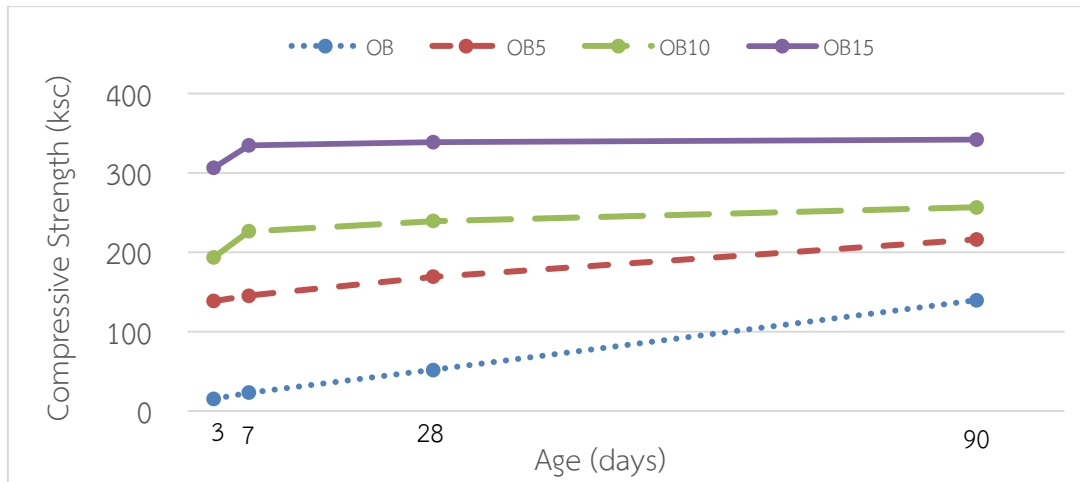
ต่างๆ ตามภาพประกอบ 15(ก) และ 15(ข) พบว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิมีการพัฒนากำลังอัดตามอายุ ทดสอบและการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์อย่างสม่ำเสมอ ยกเว้น A/B เท่ากับ 0.50 ที่กำลังลดลงเมื่อมีการ แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 แต่ภาพประกอบ 15(ค) เมื่อมีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 15 กำลังรับแรงอัดจะมีการพัฒนาเล็กน้อยเมื่ออายุผ่านไป 7 วัน และการพัฒนากำลังอัดตามการ แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์อย่างสม่ำเสมอในช่วงร้อยละ 0-10 และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อแทนที่ร้อยละ 15 ใน ภาพประกอบ 16 กำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน จะเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์โดย ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.60 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า การแทนที่ด้วย ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงจะมีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัด (ยกเว้น ส่วนผสม 15C50OT) อย่างมีนัยสำคัญ



(ก) A/B เท่ากับ 0.50

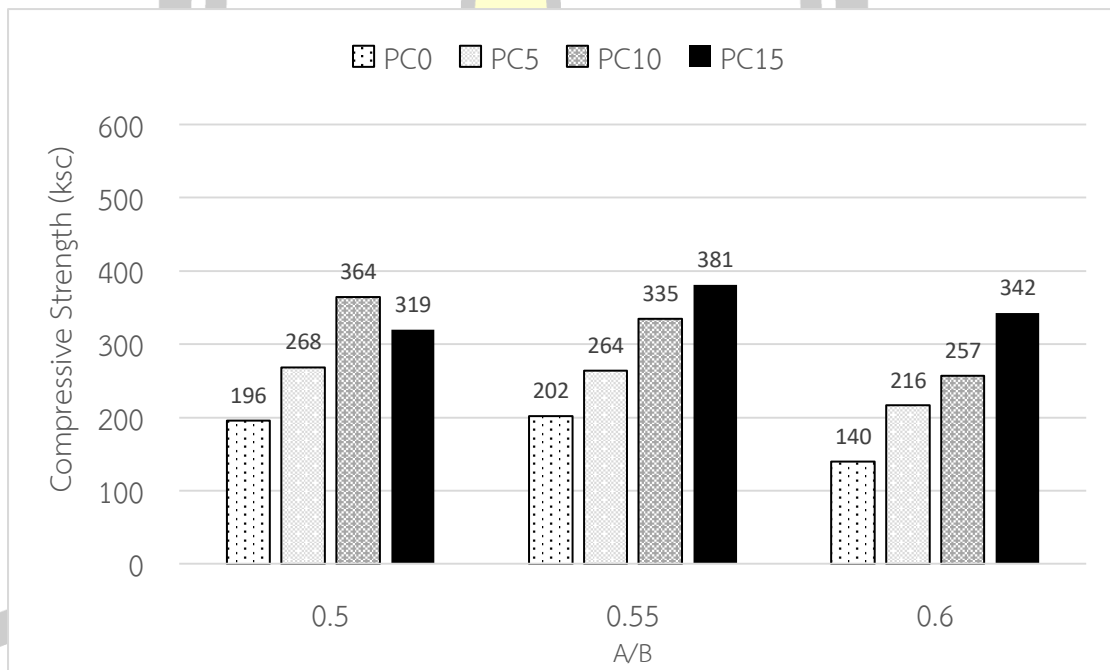


(ข) A/B เท่ากับ 0.55



(ค) A/B เท่ากับ 0.60

ภาพประกอบ 15 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม จากวิธีการบ่มอุณหภูมิ ที่อายุต่างๆ

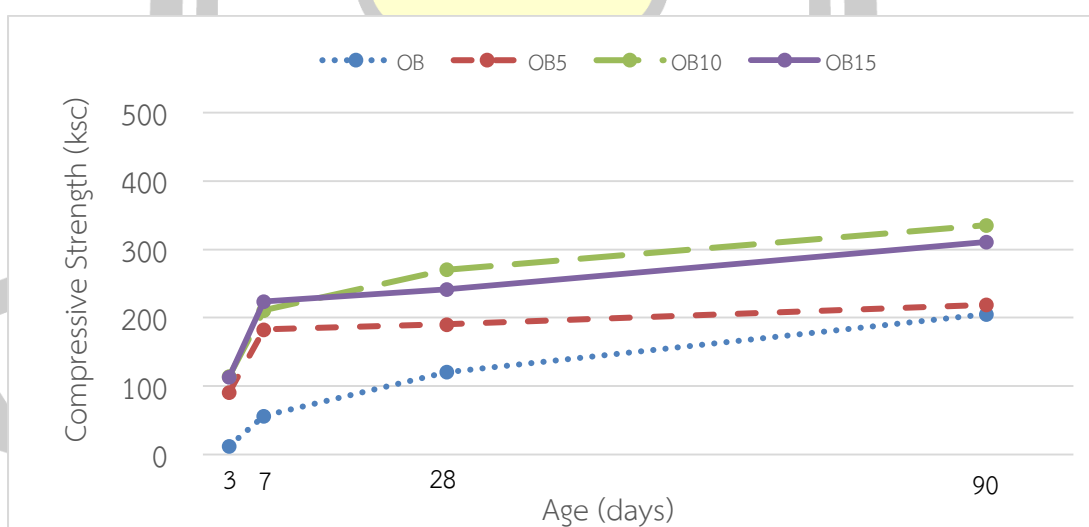


ภาพประกอบ 16 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม จากวิธีการบ่มอุณหภูมิ ที่อายุ 90 วัน

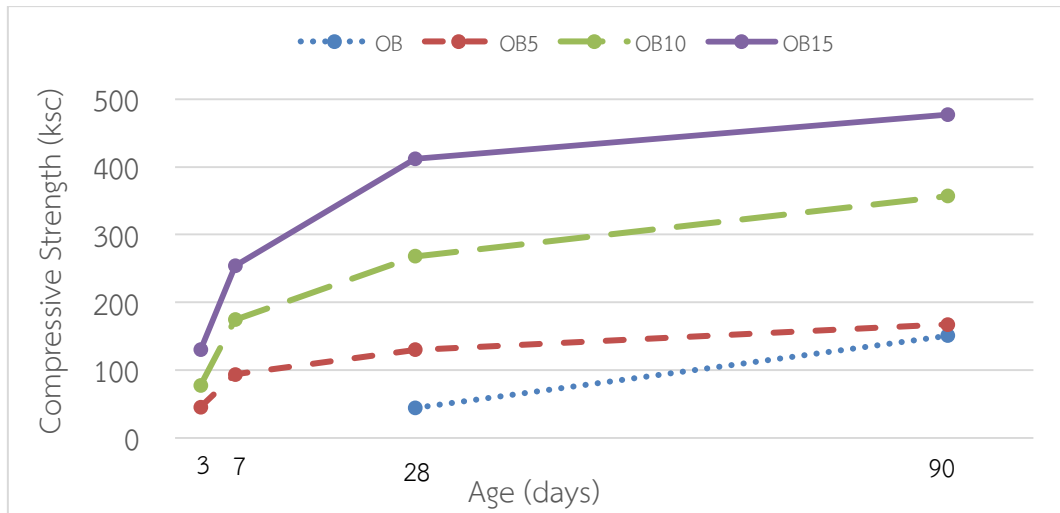
## 2. กรรมวิธีการนี้

ส่วนผสมอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.60 โดยน้ำหนัก ด้วยกรรมวิธีการบ่มน้ำ เปรียบเทียบการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-15 ของเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม พบว่าปูนซีเมนต์มีส่วนสำคัญในการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ให้มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้น

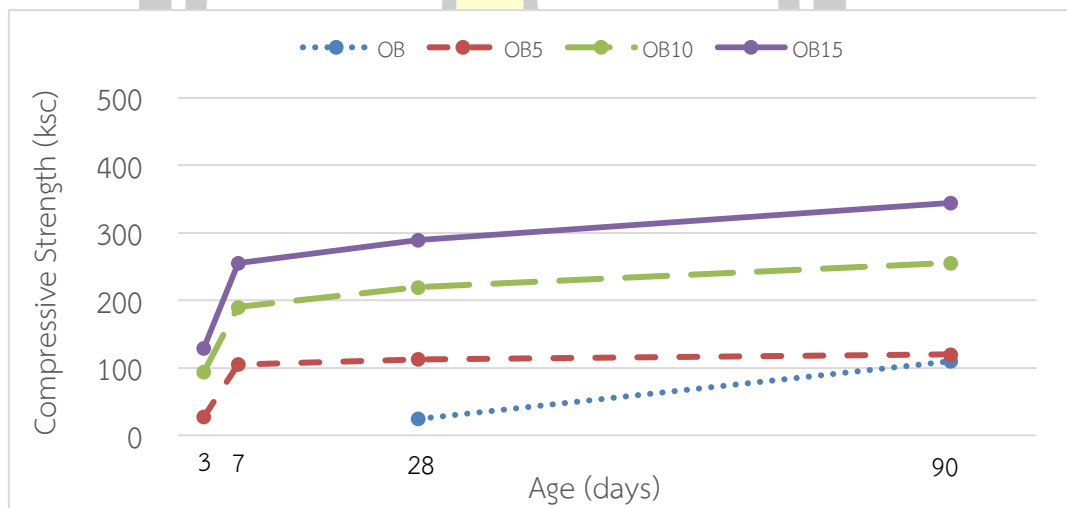
ตัวอย่าง 15C50OW เช่นเดียวกับกรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการบ่มน้ำจะมีน้ำช่วยในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในส่วนผสม แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันอาจต้องการน้ำในช่วงเริ่มทำปฏิกิริยามากกว่า (หลังขั้นตอนผสม) เพื่อพัฒนากำลังรับแรงอัด โดยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานต้องมีความเหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากเมื่อลดอัตราส่วนลงทำให้มีน้ำไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนขึ้นทำให้สารละลายเหลือจากการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างที่ได้กำลังรับแรงอัดมากที่สุดที่อายุ 90 วัน ของอัตราส่วน 15C55OW เท่ากับ 477 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากภาพประกอบ 17(ก) - (ค) มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามอายุทดสอบและการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ ยกเว้นการแทนที่ร้อยละ 15 ของ A/B เท่ากับ 0.50 โดยการพัฒนาของทุกส่วนผสมกำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง 3-7 วันจากนั้นค่อยๆ สูงขึ้นคล้ายการพัฒนากำลังของคอนกรีต แต่การแทนที่ร้อยละ 5 ในทุกอัตราส่วน พบว่า เมื่ออายุผ่านไป 7 วัน จะมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพรวมที่อายุ 90 วัน กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ ยกเว้นอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ร้อยละ 5 ไม่มีความแตกต่างกันในทุกอัตราส่วนสารละลาย อาจเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เพียงพอต่อการพัฒนากำลังหรือให้ความร้อนต่อจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยปริมาณปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นเพียงเท่านั้น เมื่อระยะเวลายาวทำให้มีความแตกต่างไม่มากนัก แต่เมื่อแทนที่ปริมาณร้อยละ 10 และ 15 พบว่ากำลังรับแรงอัดพัฒนากำลังอัดได้ดีตามอายุทดสอบเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.55 ตามภาพประกอบ 18



(ก) A/B เท่ากับ 0.50



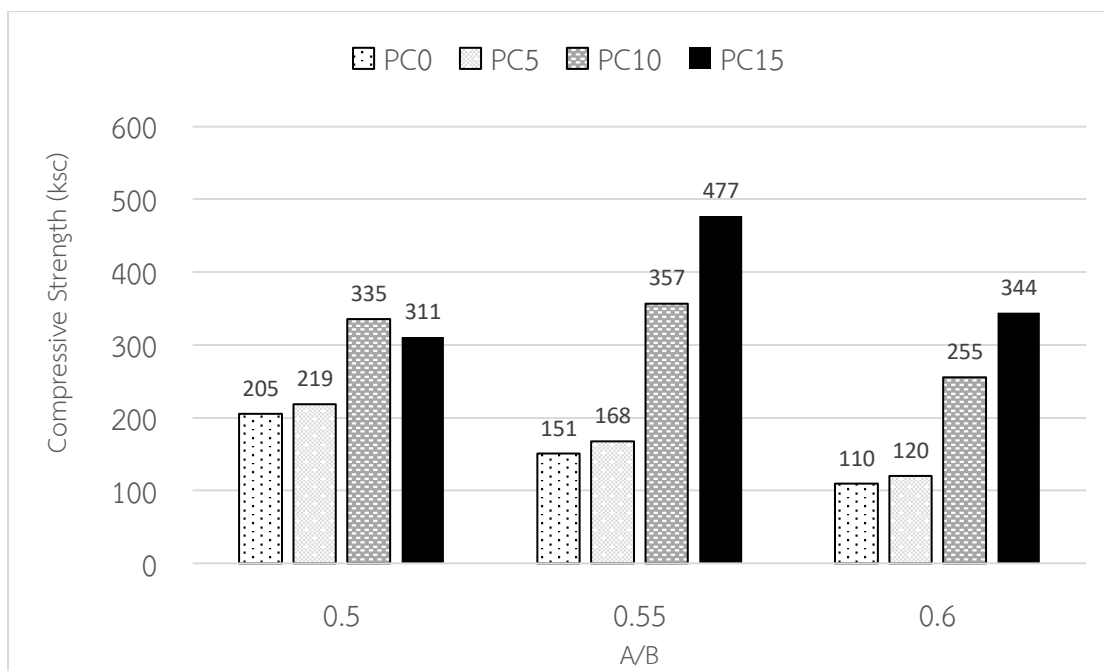
(ข) A/B เท่ากับ 0.55



(ค) A/B เท่ากับ 0.60

ภาพประกอบ 17 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม จากวิธีการบ่มน้ำ ที่อายุต่างๆ

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 18 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม จากวิธีการบ่มน้ำ ที่อายุ 90 วัน

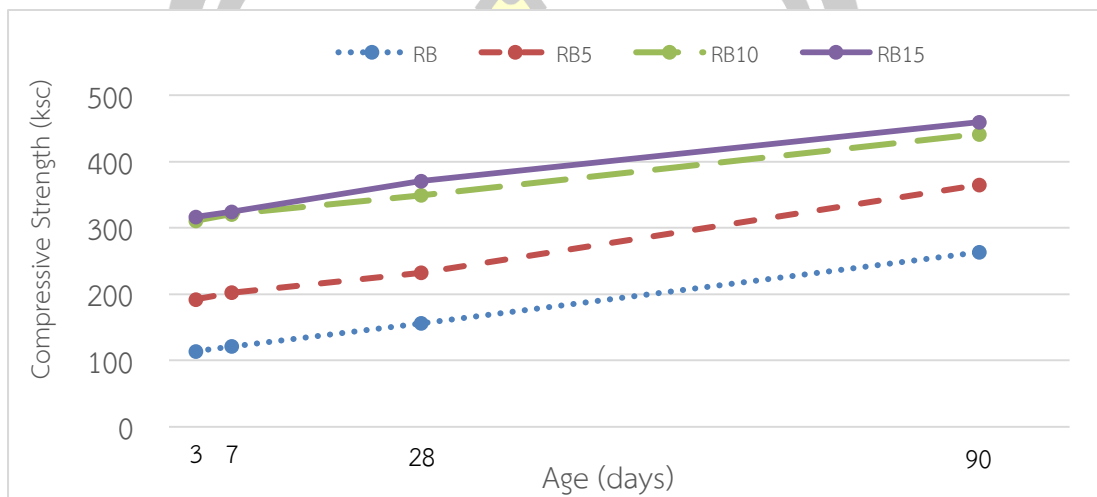
#### 4.4.2 ผลการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ

##### 1. กรรมวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ

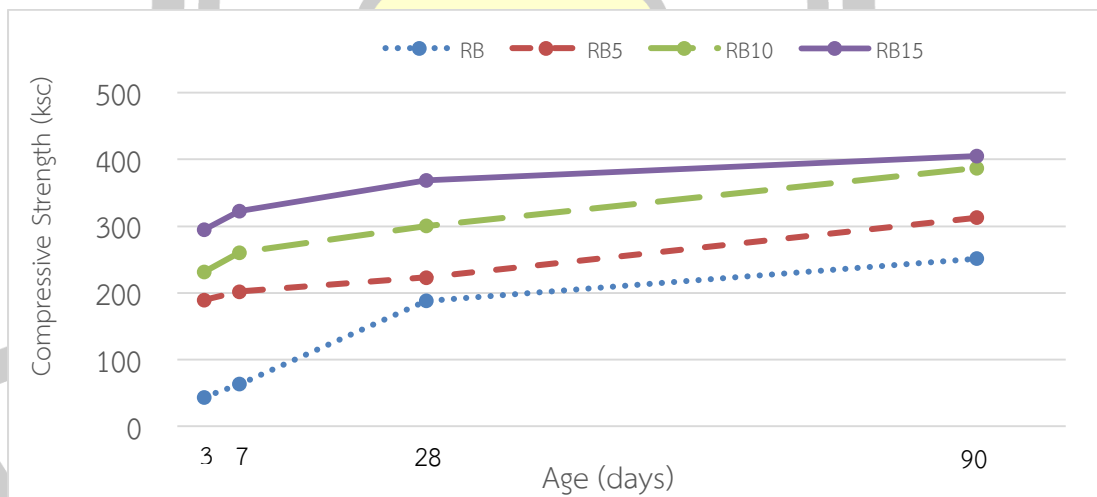
เปลี่ยนวัสดุตั้งต้นเป็นเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ ใช้อัตราส่วนเช่นเดียวกับเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม ด้วยวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าปูนซีเมนต์ยังเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ถึงแม้จะมีการปรับปรุงคุณภาพเถ้าชานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ แต่แตกต่างกับเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมในอัตราส่วน 15C50OT จากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ในอัตราส่วนสารละลายเท่ากัน ( $A/B = 0.50$ ) เถ้าชานอ้อยเผาซ้ำให้ผลทดสอบแตกต่างออกไป อาจเนื่องจากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีความต้องการน้ำและการดูดซึมน้ำน้อยกว่าเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม ทำให้ปริมาณสารละลายเพียงพอในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้เถ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีแนวโน้มกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจากการลดอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานลง ตัวอย่างที่ได้กำลังรับแรงอัดมากที่สุดที่อายุ 90 วัน ได้แก่ 15C50RT เท่ากับ 459 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากภาพประกอบ 19(ก) – (ค) การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุทดสอบอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อสังเกตการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 – 15 จะมีค่ากำลังที่ใกล้เคียงหรือต่างกันเล็กน้อยในทุกอัตราส่วนสารละลาย ทั้งนี้อาจเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในการบ่มด้วยอุณหภูมิไม่สามารถพัฒนากำลังให้สูงขึ้นได้ถึงแม้จะ



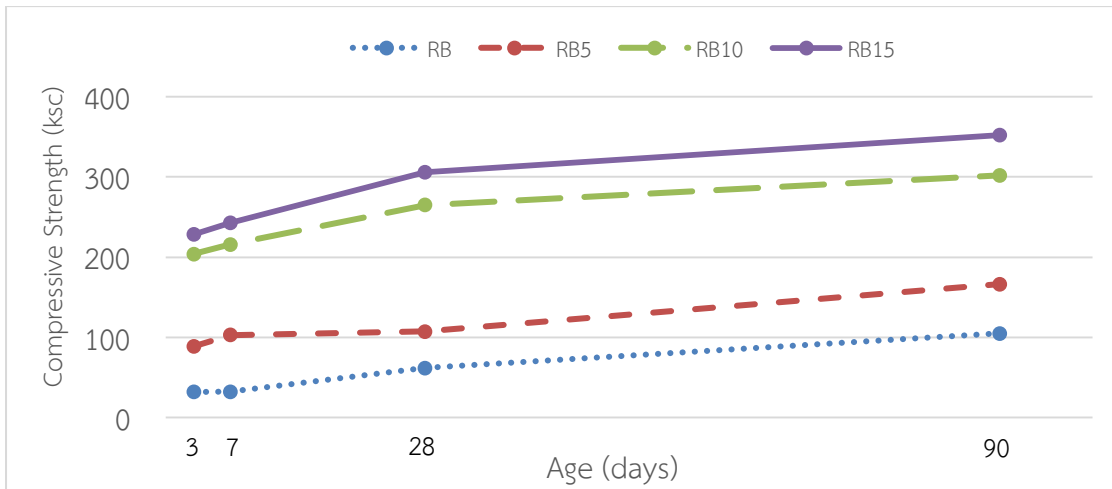
มีการแทนที่เพิ่มขึ้น และช่วงการพัฒนากำลังจากการแทนที่ร้อยละ 5 ไปถึงร้อยละ 10 ของอัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.60 มีค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันมาก เนื่องจากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำมีความต้องการน้ำต่ำ เมื่อได้รับสารละลายในปริมาณมากเกินไปจนความจำเป็นทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ และสังเกตโดยรวมที่อายุ 90 วัน ตามภาพประกอบ 20 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน A/B ขึ้นส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทุกระดับการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ ทั้งนี้อาจเนื่องจากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำต้องการปริมาณสารละลายต่ำกว่าเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม



(ก) A/B เท่ากับ 0.50

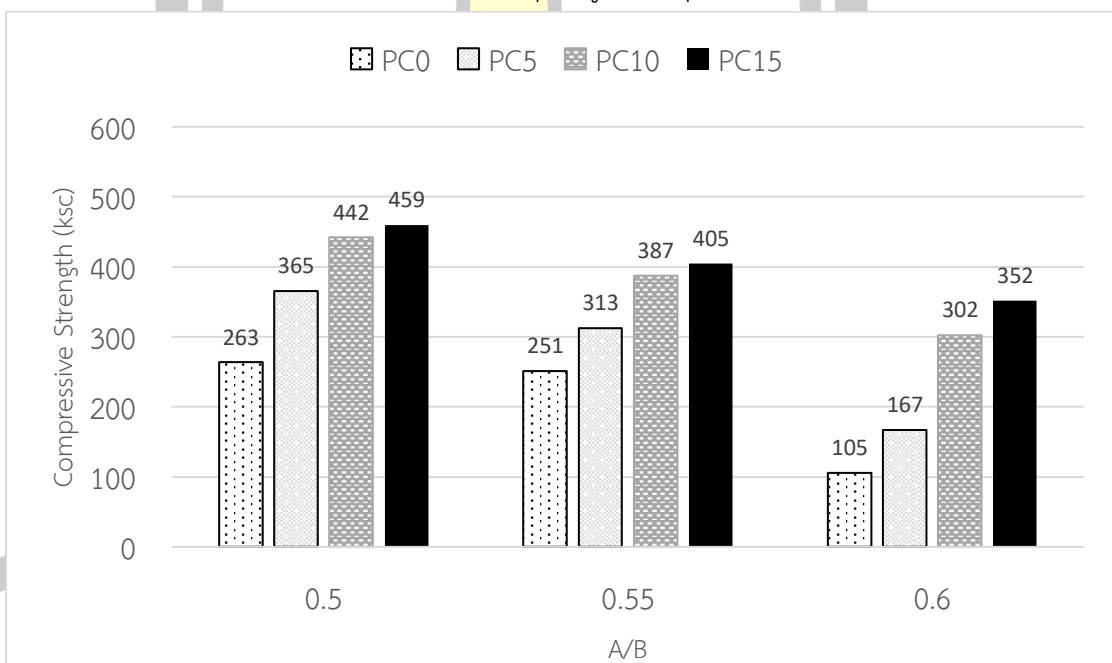


(ข) A/B เท่ากับ 0.55



(ค) A/B เท่ากับ 0.60

ภาพประกอบ 19 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มอุณหภูมิ ที่อายุต่างๆ

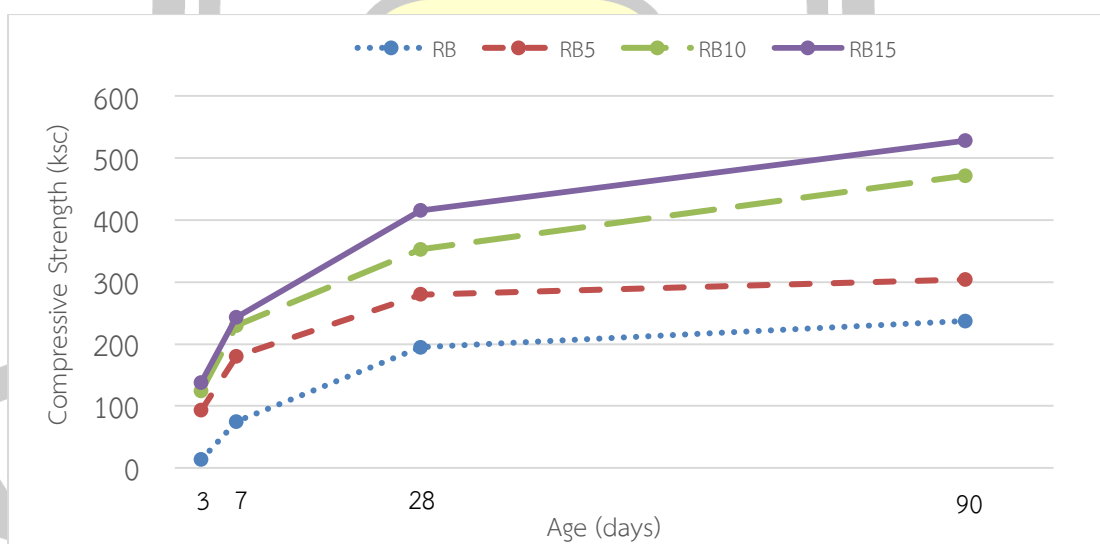


ภาพประกอบ 20 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มอุณหภูมิ ที่อายุ 90 วัน

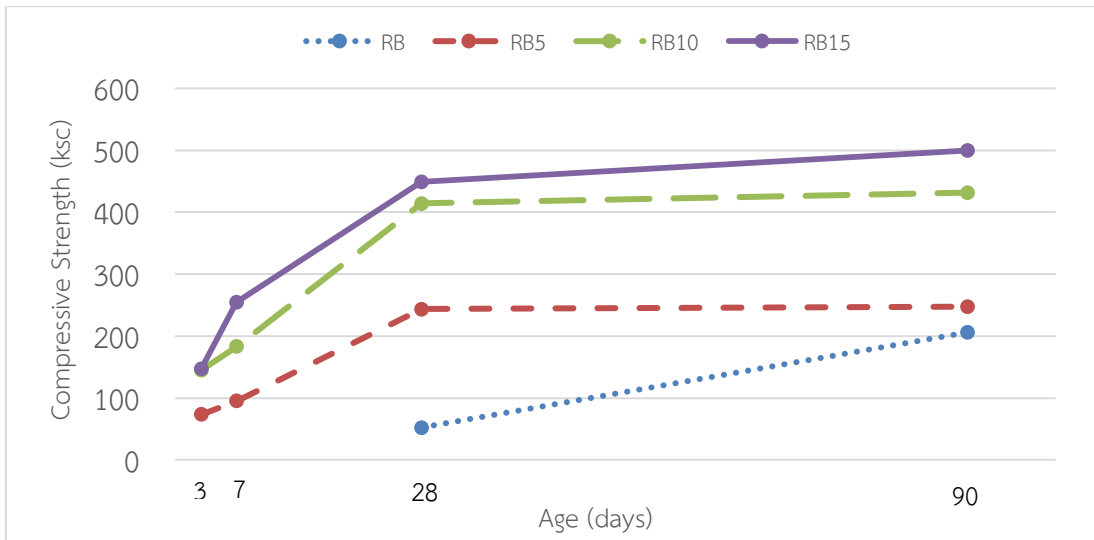
## 2. กรรมวิธีการนี้

เถ้าขาน้อยเผาซ้ำเป็นวัสดุตั้งต้น เพื่อใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ในการศึกษาผลของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์โดยใช้ส่วนผสมเดียวกับเถ้าขาน้อยดั้งเดิม จากกรรมวิธีการบ่มน้ำ

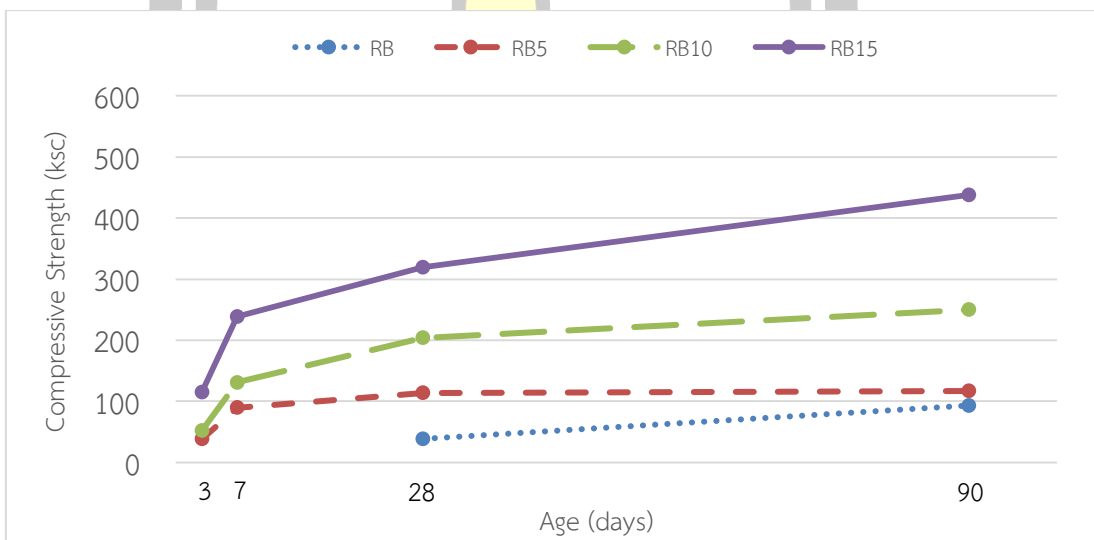
พบว่าปูนซีเมนต์รวมเข้ากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อลดอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานลงยังส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างที่ได้กำลังรับแรงอัดมากที่สุดที่อายุ 90 วัน ของอัตราส่วน 15C50RW เท่ากับ 529 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากภาพประกอบ 21(ก) และ 21(ข) มีการพัฒนากำลังจากผลการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์คล้ายคลึงกัน แต่การพัฒนากำลังตามอายุทดสอบ พบว่าการแทนที่ร้อยละ 10 และ 15 ของ A/B เท่ากับ 0.50 มีการพัฒนาได้ดีกว่า 0.55 ในช่วงอายุ 28-90 วัน แต่การแทนที่ร้อยละ 5 และไม่แทนที่นั้นมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันและมีกำลังต่างจากการแทนที่ร้อยละ 10 และ 15 อย่างมาก เช่นเดียวกับเก้าชานอ้อยดั้งเดิมด้วยวิธีการบ่มน้ำ ในภาพประกอบ 21(ค) อัตราส่วนสารละลายเท่ากับ 0.60 จากการแทนที่ร้อยละ 0-10 มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและสูงขึ้นเมื่อแทนที่ร้อยละ 15 แตกต่างกับสารละลายอัตราส่วน 0.50 และ 0.55 อาจเนื่องจากสารละลายมีปริมาณเกินความจำเป็น ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังต่ำจากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ เมื่อสังเกตโดยรวมตามภาพประกอบ 22 ที่อายุ 90 วัน ของ A/B ทุกอัตราส่วน พบว่าการแทนที่ร้อยละ 5 และการไม่เติมปูนซีเมนต์มีค่าแตกต่างไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ร้อยละ 10 และ 15 เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยไม่เพียงพอต่อการพัฒนากำลังของจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยภาพรวมกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารละลายลดลง



(ก) A/B เท่ากับ 0.50

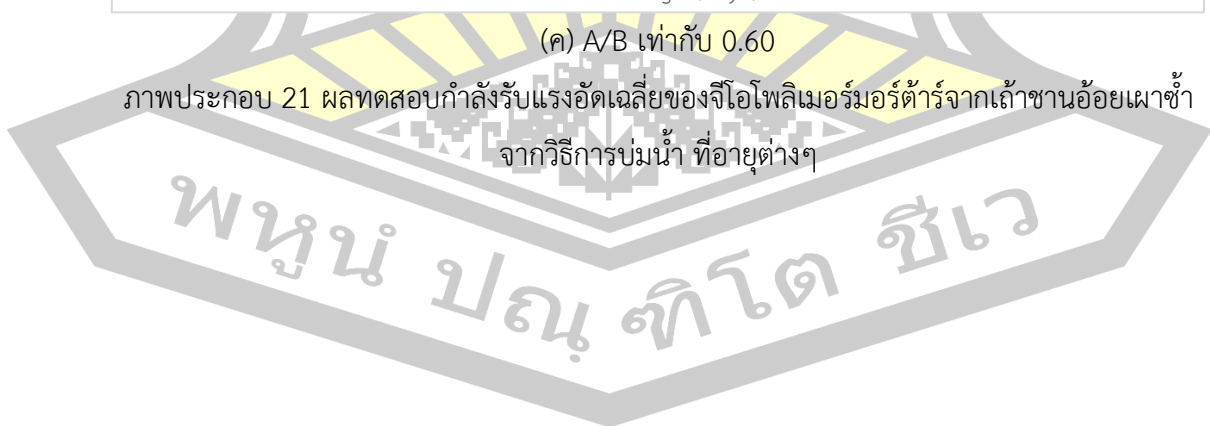


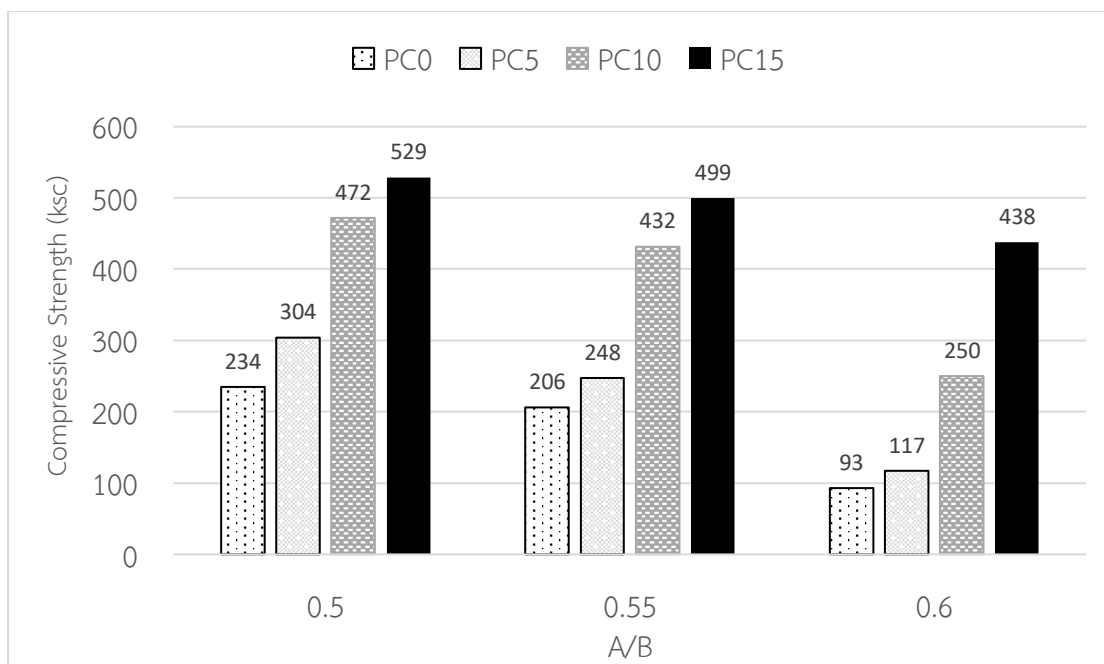
(ข) A/B เท่ากับ 0.55



(ค) A/B เท่ากับ 0.60

ภาพประกอบ 21 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มน้ำ ที่อายุต่างๆ





ภาพประกอบ 22 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มน้ำ ที่อายุ 90 วัน

ดังนั้นการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดีที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ร้อยละ 10 พบว่ามีความแตกต่างกันไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนและความคุ้มค่า เนื่องจากจุดประสงค์การแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อแก้ไขปัญหาในการบ่มของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย ทั้งนี้เถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบทางเคมีมีซิลิกาสูงกว่าอลูมินามาก ด้วยร้อยละ 68 และ 4 ตามลำดับ ในประเทศไทยได้ศึกษาจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วนที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่ดี ต้องมีอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 2:1 หรือ 3:1 (Davidovits, 2008) เมื่อทำการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงขึ้นทำให้องค์ประกอบทางเคมีในส่วนผสมเปลี่ยนไป และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ (Pangdaeng et al., 2014)

#### 4.4.3 ผลของอัตราส่วนสารละลาย

เปรียบเทียบอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าขานอ้อย เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดในอัตราส่วนสารละลายใกล้เคียงกัน เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงขึ้นไปให้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าขานอ้อยมีการเปลี่ยนแปลง โดยทั้งนี้แสดงผลตามตาราง 21 22 และ 23 เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ส่งผลให้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น 0.03 จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าขานอ้อย (A/BA) เท่ากับ 0.55-0.56 ได้แก่ 0C55OT และ 10C50OT ส่วนผสมไม่มีการเติมปูนซีเมนต์และเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ตามลำดับ จากการบ่มที่อุณหภูมิ พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 202 และ 364 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นมาเป็นผลจากการเติมปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เปรียบเทียบกับการบ่มน้ำ ได้แก่ 15C50OW 0C60OW และ 10C55OW โดย A/BA เท่ากับ 0.59-0.61 มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 311 110 และ 357 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จากการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ไม่เติมปูนซีเมนต์และเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 พบว่ากำลังรับแรงอัดมีผลต่อกำลังรับมากขึ้นจากการบ่มน้ำ แต่ทั้งนี้กลับพบว่าการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณสารละลายไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและไม่สามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดได้อย่างต่อเนื่องได้ โดยผลของอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าขานอ้อย (A/BA) ของเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมทุกอัตราส่วนผสม

#### 4.4.4 ผลของการปรับปรุงคุณภาพเถ้าขานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ

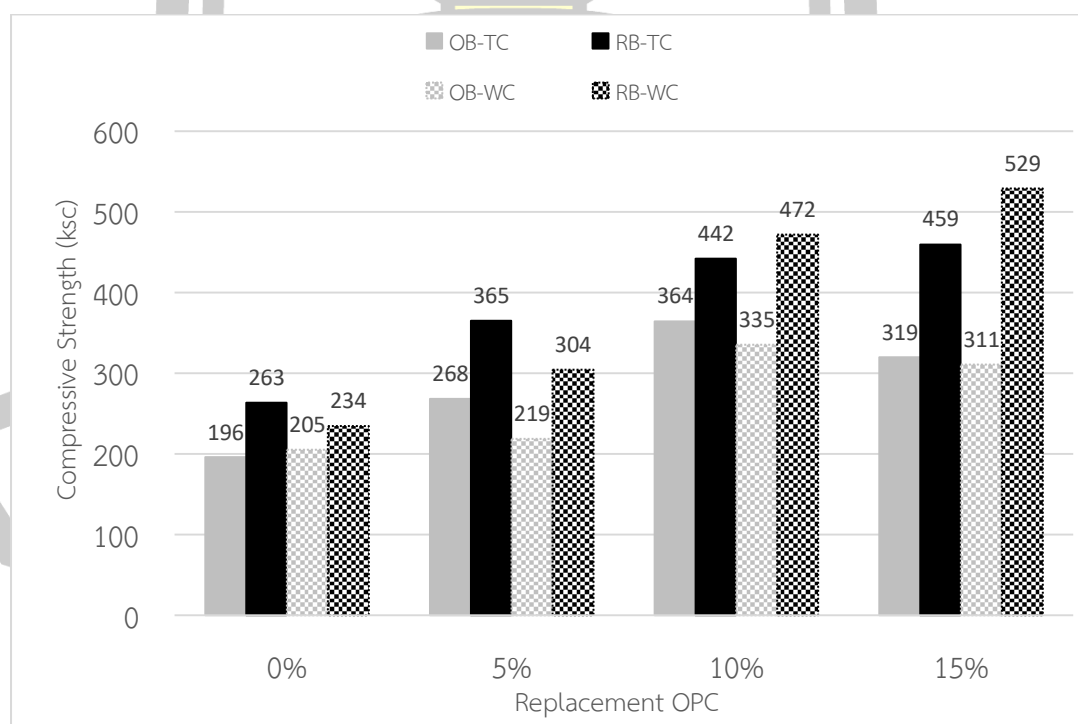
เปรียบเทียบเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ จากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 5 10 และ 15 ด้วยวิธีการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และวิธีการบ่มน้ำ พบว่าเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดส่วนใหญ่ดีกว่าเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม เนื่องจากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำมีค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ต่ำกว่าเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม ยกเว้น A/B เท่ากับ 0.60 โดยการเผาเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเถ้าขานอ้อยลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเพ็ญชาย และคาวี (คาวี มณฑการติวงค์, 2548; เพ็ญชาย เวียงใต้ และเรืองรุชดี ชีระโรจน์, 2553) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเถ้าขานอ้อยที่มีค่า LOI แตกต่างกัน และขนาดอนุภาคแตกต่างกัน พบว่า เถ้าขานอ้อยที่มีค่า LOI ต่ำ ส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดดีขึ้นแต่น้อยกว่าอิทธิพลจากความละเอียดของเถ้าขานอ้อย โดยจากภาพประกอบ 23(ก) อัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.50 เถ้าขานอ้อยส่งผลดีขึ้นเรื่อยๆ



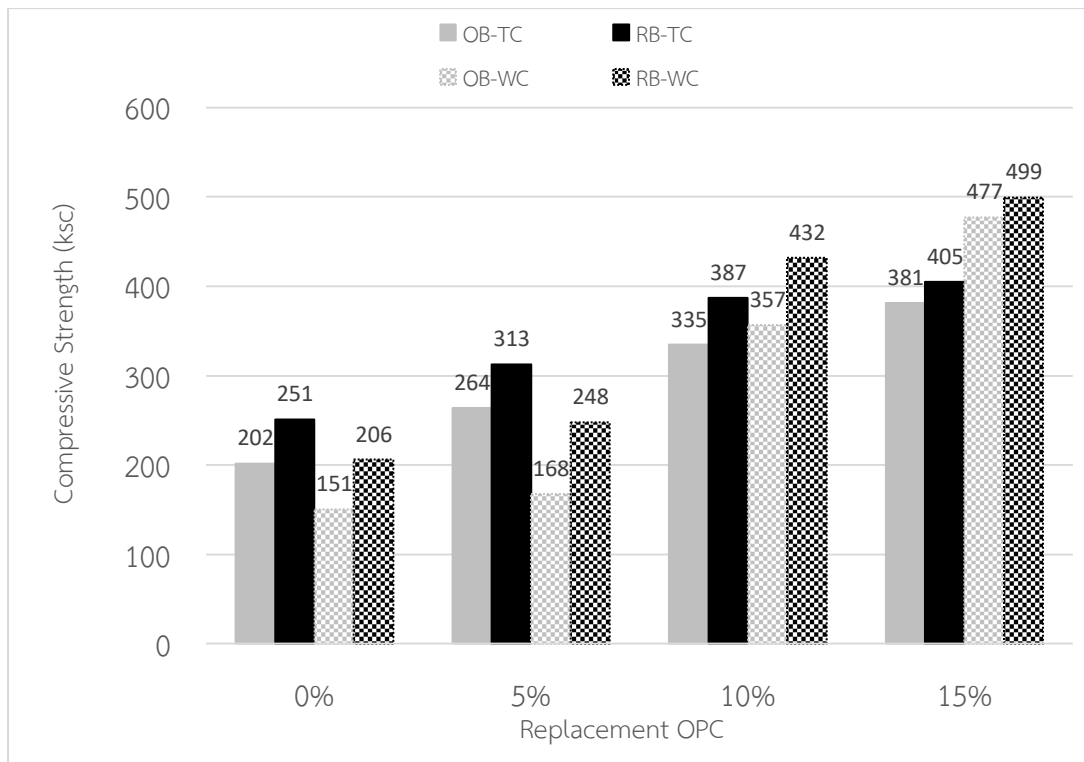
ตาราง 23 เปรียบเทียบอัตราส่วนสารละลายต่อเก้าชานอ้อย

อัตราส่วนผสม	การแทนที่ปูนซีเมนต์ในเก้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	A/BA	อัตราส่วนผสม	การแทนที่ปูนซีเมนต์ในเก้าชานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	A/BA
0C50OT	0	0.50	0.50	0C50RT	0	0.50	0.50
0C55OT	0	0.55	0.55	0C55RT	0	0.55	0.55
0C60OT	0	0.60	0.60	0C60RT	0	0.60	0.60
5C50OT	5	0.50	0.53	5C50RT	5	0.50	0.53
5C55OT	5	0.55	0.58	5C55RT	5	0.55	0.58
5C60OT	5	0.60	0.63	5C60RT	5	0.60	0.63
10C50OT	10	0.50	0.56	10C50RT	10	0.50	0.56
10C55OT	10	0.55	0.61	10C55RT	10	0.55	0.61
10C60OT	10	0.60	0.67	10C60RT	10	0.60	0.67
15C50OT	15	0.50	0.59	15C50RT	15	0.50	0.59
15C55OT	15	0.55	0.65	15C55RT	15	0.55	0.65
15C60OT	15	0.60	0.71	15C60RT	15	0.60	0.71
0C50OW	0	0.50	0.50	0C50RW	0	0.50	0.50
0C55OW	0	0.55	0.55	0C55RW	0	0.55	0.55
0C60OW	0	0.60	0.60	0C60RW	0	0.60	0.60
5C50OW	5	0.50	0.53	5C50RW	5	0.50	0.53
5C55OW	5	0.55	0.58	5C55RW	5	0.55	0.58
5C60OW	5	0.60	0.63	5C60RW	5	0.60	0.63
10C50OW	10	0.50	0.56	10C50RW	10	0.50	0.56
10C55OW	10	0.55	0.61	10C55RW	10	0.55	0.61
10C60OW	10	0.60	0.67	10C60RW	10	0.60	0.67
15C50OW	15	0.50	0.59	15C50RW	15	0.50	0.59
15C55OW	15	0.55	0.65	15C55RW	15	0.55	0.65
15C60OW	15	0.60	0.71	15C60RW	15	0.60	0.71

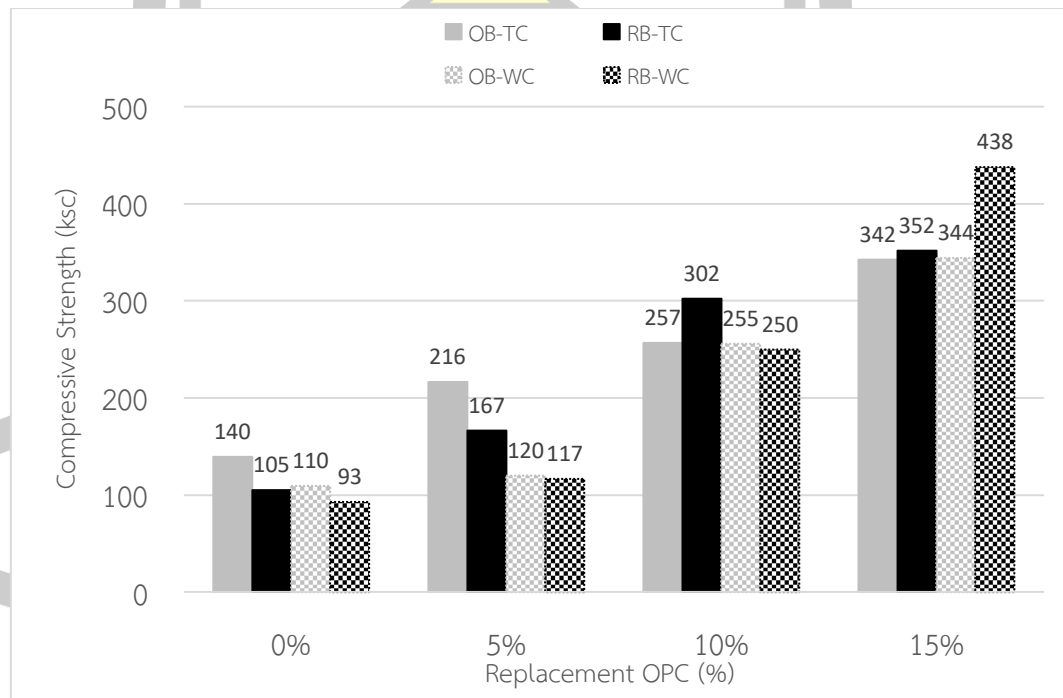
จากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ แตกต่างจากเถาซานอ้อยดั้งเดิมที่กำลังลดลงจากการแทนที่ร้อยละ 15 ภาพประกอบ 23(ข) อัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.55 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ อัตราส่วน 0.50 แต่กลับพบว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นจากเถาซานอ้อยเผาซ้ำต่างเพียงเล็กน้อยกับเถาซานอ้อยดั้งเดิม (ร้อยละ 4-47) และเมื่อทำการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณสูงขึ้น (ร้อยละ 15) จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดมีความแตกต่างกันไม่มากนัก (ร้อยละ 5) เนื่องจากการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณมาก ของการบ่มด้วยอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ และการบ่มน้ำทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องของเถาซานอ้อยสองแบบ ทำให้กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการปรับปรุงคุณภาพเถาซานอ้อยด้วยการเผาซ้ำแต่ในอัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.50 ที่มีกำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกันมากนั้น (ร้อยละ 14-70) เป็นผลจากอัตราส่วนสารละลาย และภาพประกอบ 23(ค) อัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.60 การบ่มด้วยอุณหภูมิส่งผลทำให้เถาซานอ้อยดั้งเดิมมีกำลังสูงกว่าเถาซานอ้อยเผาซ้ำในช่วงการแทนที่ 0-5 จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ขึ้นถึงจะส่งผลให้เถาซานอ้อยเผาซ้ำมีกำลังอัดที่ดีกว่า และการบ่มน้ำมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันแต่เถาซานอ้อยเผาซ้ำจะมีกำลังอัดที่ดีกว่าเมื่อแทนที่ถึงร้อยละ 15 ทั้งนี้เถาซานอ้อยเผาซ้ำมีค่ากำลังต่ำกว่าเถาซานอ้อยดั้งเดิมจากสองวิธีการบ่ม อาจเนื่องจากเถาซานอ้อยเผาซ้ำมีความต้องการน้ำต่ำและได้รับปริมาณสารละลายเกินความจำเป็น เมื่อมีปูนซีเมนต์มากขึ้นจึงสามารถนำสารละลายที่เกินความจำเป็นมาทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน



(ก) A/B เท่ากับ 0.50



(ข) A/B เท่ากับ 0.55



(ค) A/B เท่ากับ 0.60

ภาพประกอบ 23 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม และเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ จากวิธีการบ่มสองวิธี ที่อายุ 90 วัน

ดังนั้น พบว่าการเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดดีกว่าเฝ้าชานอ้อยดั้งเดิม ทั้งกรรมวิธีการบ่มอุณหภูมิจากกรรมวิธีบ่มน้ำ โดยเฝ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีค่า LOI เท่ากับ 11.2 และ 6.4 ทำให้เฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำจัดอยู่ในหมวดวัสดุพอลิโซลัน Class N (LOI >10) แต่เนื่องจากเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำเมื่อนำมาผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์จะต้องทำการเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของ เฝ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 477 และ 529 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันเพียง 52 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ ร้อยละ 11 เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีในการเตรียมตัวอย่างและพลังงานที่เพิ่มขึ้นแล้ว พบว่าไม่มี ความคุ้มค่าในการทำจีโอโพลิเมอร์จากเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำ

#### 4.4.5 ผลของวิธีการบ่ม

เปรียบเทียบอัตราส่วนสารละลายที่มีผลต่อการบ่ม จากภาพประกอบที่ 23(ก)-(ค) พิจารณา การแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด พบว่าเฝ้าชานอ้อยดั้งเดิมที่มีอัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.50 และ 0.60 ไม่มีอิทธิพลจากผลการบ่ม ยกเว้น A/B เท่ากับ 0.55 ที่ผลจากการบ่มน้ำ มีค่ากำลังสูงกว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ ส่วนเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำไม่มีความแตกต่างจากผลของการบ่มทั้งสองวิธี เมื่อลดการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ในทุกอัตราส่วนสารละลายของเฝ้าชานอ้อยดั้งเดิม ไม่ส่งผลต่อกำลัง มีเพียงเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำที่ส่งผลกระทบต่อการใช้อัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.60 เมื่อลด การแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ลงร้อยละ 5 ก็ยังไม่มีผลกระทบต่อผลการบ่มที่มีต่ออัตราส่วนละลาย สุดท้าย เมื่อไม่เติมปูนซีเมนต์ เฝ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเฝ้าชานอ้อยเผาซ้ำจะส่งผลต่อกำลังเมื่อมีการลดปริมาณ สารละลายลง ในส่วนของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อการบ่ม มีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งเฝ้า ชานอ้อยสองแบบ โดยการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และไม่เติมปูนซีเมนต์ การบ่มน้ำจะส่งผลให้ มีกำลังอัดต่ำกว่าการบ่มอุณหภูมิตลอดทุกช่วงอายุ เนื่องจากปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างต่อเนื่อง จากการบ่มน้ำ แต่เมื่อไม่เติมปูนซีเมนต์วิธีการบ่มอุณหภูมิมิมีค่าสูงกว่าเนื่องจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันใช้ความร้อนในการพัฒนากำลังอัด ในการแทนที่ร้อยละ 5 มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำจึงไม่สามารถ ผลิต CSH ช่วยเสริมกำลังอัด ทำให้กำลังหลักมาจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน สอดคล้องกับงานวิจัย จีโอโพลิเมอร์จากเฝ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์บางส่วนเปรียบเทียบระหว่างการบ่มน้ำและการบ่ม อุณหภูมิ (Pangdaeng et al., 2014) และจะพัฒนากำลังอัดขึ้นเมื่อมีการแทนที่ร้อยละ 10-15 แต่จะ มีเพียงเฝ้าชานอ้อยดั้งเดิมอัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.50 เท่านั้นที่การบ่มน้ำมีค่าต่ำกว่าการบ่มด้วย อุณหภูมิทุกช่วงการแทนที่ยกเว้น OC50OW ที่มีค่ามากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากเฝ้าชานอ้อยดั้งเดิมเมื่อ ปริมาณสารละลายน้อย ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ ทำให้กำลังรับแรงส่วนมากขึ้นอยู่กับ

ปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน และส่วนผสม 0C50OW ที่มีค่ามากกว่า 0C50OT อาจเนื่องจากความร้อนทำให้เกิดรอยร้าวเล็ก ๆ (Micro Crack) แต่กำลังรับแรงอัดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สุดท้ายผลกระทบของวิธีการบ่มต่ออายุทดสอบ ตามภาพประกอบ 15(ก)-(ค) และ 19(ก)-(ค) เป็นการบ่มด้วยอุณหภูมิสังเกตได้ว่าในช่วงเวลา 3 วัน กำลังรับแรงอัดสูงและพัฒนาอย่างสม่ำเสมอจนถึงอายุ 90 วัน และภาพประกอบ 17(ก)-(ค) และ 21(ก)-(ค) เป็นการบ่มน้ำจะเห็นว่าแนวโน้มมีการพัฒนาอย่างช้าๆ ในช่วง 3-7 วัน อย่างนั้นพัฒนาอย่างมากเมื่ออายุ 28 วันและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุการทดสอบ เมื่อทำการเปรียบเทียบกันแล้วการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปริมาณสูง (ร้อยละ 15) กำลังอัดของการบ่มน้ำจะมีค่าสูงกว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิที่อายุ 28 วันขึ้นไป

ดังนั้น พบว่าถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและถ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีกำลังรับแรงอัดที่ดีต่อการบ่มน้ำ โดยมีกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด เท่ากับ 529 และ 477 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จากวัตถุประสงค์ต้องการลดการใช้พลังงานจากการบ่มอุณหภูมิโดยการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับถ้าชานอ้อยดั้งเดิมด้วยการไม่เติมปูนซีเมนต์ เท่ากับ 477 และ 151 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมา 326 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อคิดราคาจากการเติมปูนซีเมนต์ต่อหน่วยลูกบาศก์เมตรจะมีราคาเพิ่มขึ้นประมาณ 210 บาท และเมื่อเปรียบเทียบการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากการบ่มน้ำและบ่มอุณหภูมิ มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 477 และ 381 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อคำนวณราคาจากการบ่มอุณหภูมิในพลังงานที่ใช้มีราคาประมาณ 200 บาท ต่อการบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

#### 4.4.6 ผลของการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ

งานวิจัยในส่วนที่สองเป็นการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 คงที่ และใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานของถ้าชานอ้อยดั้งเดิม และถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ เท่ากับ 0.55 และ 0.50 ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำ สารลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนร้อยละ 3-5 และน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนอย่างละร้อยละ 3 และ 5 ของวัสดุประสาน ทำการบ่ม 2 แบบ คือ การบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และ การบ่มน้ำ ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1.00 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ดังแสดงในตาราง 24

ตาราง 24 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยดั้งเดิมและเถ้าขาน้อยเผา  
 ซ้ำโดยกรรมวิธีการบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และการบ่มน้ำ

ชื่อ สัดส่วน ผสม	อัตรา ส่วนผสม	การแทนที่ ปูนซีเมนต์ใน เถ้าขาน้อย (ร้อยละ)	A/B	NS/NH	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
					3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
1TO	3W-OT	15	0.55	1	261	338	384	412
2TO	5W-OT	15	0.55	1	208	242	283	322
3TO	3SP-OT	15	0.55	1	277	290	315	326
4TO	5SP-OT	15	0.55	1	197	210	232	270
5TO	3WSP-OT	15	0.55	1	247	256	275	311
6TO	5WSP-OT	15	0.55	1	184	187	194	236
7TR	3W-RT	15	0.50	1	323	336	365	461
8TR	5W-RT	15	0.50	1	372	386	394	484
9TR	3SP-RT	15	0.50	1	239	254	282	335
10TR	5SP-RT	15	0.50	1	205	225	249	315
11TR	3WSP-RT	15	0.50	1	233	242	270	378
12TR	5WSP-RT	15	0.50	1	185	197	206	286
1WO	3W-OW	15	0.55	1	179	295	415	488
2WO	5W-OW	15	0.55	1	154	223	373	414
3WO	3SP-OW	15	0.55	1	139	221	406	439
4WO	5SP-OW	15	0.55	1	118	200	275	325
5WO	3WSP-OW	15	0.55	1	133	208	358	373
6WO	5WSP-OW	15	0.55	1	77	131	250	303
7WR	3W-RW	15	0.50	1	170	251	423	533
8WR	5W-RW	15	0.50	1	185	283	441	541
9WR	3SP-RW	15	0.50	1	129	246	379	439
10WR	5SP-RW	15	0.50	1	95	182	335	414
11WR	3WSP-RW	15	0.50	1	100	214	363	455
12WR	5WSP-RW	15	0.50	1	91	171	311	349

หมายเหตุ : OT หมายถึง เถ้าขาน้อยดั้งเดิม ใช้วิธีการบ่มก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

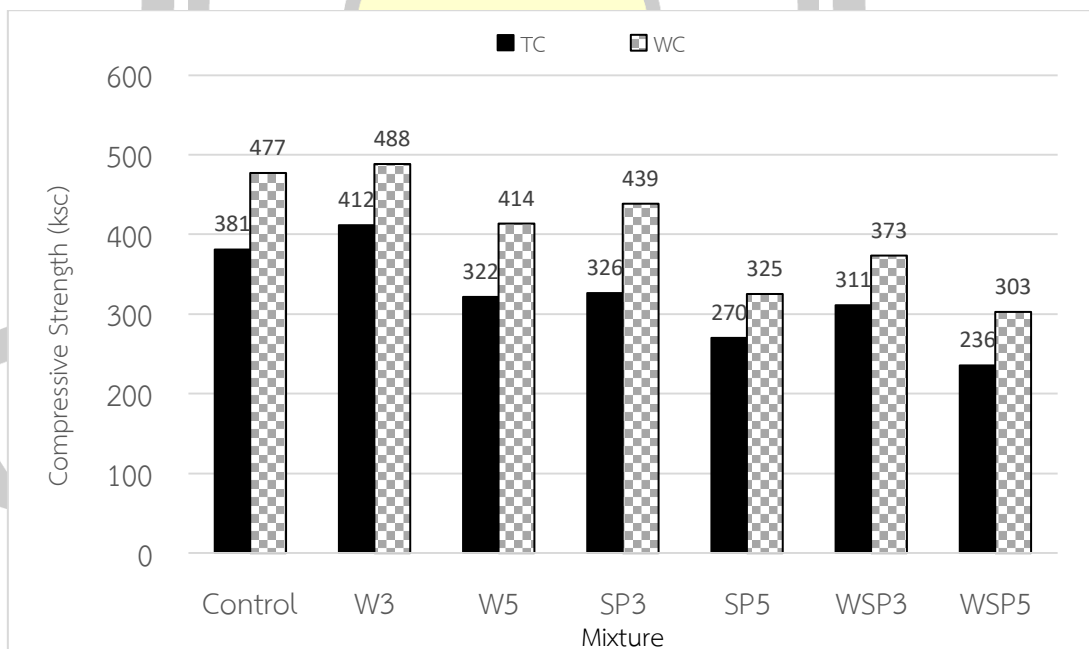
RW หมายถึง เถ้าขาน้อยที่เผาซ้ำ ใช้วิธีการบ่มก้อนตัวอย่างด้วยวิธีบ่มน้ำ

3W หมายถึง เติมน้ำร้อยละ 3 ของวัสดุประสาน

3WSP หมายถึง เติมน้ำร้อยละ 3 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 3 ของวัสดุประสาน

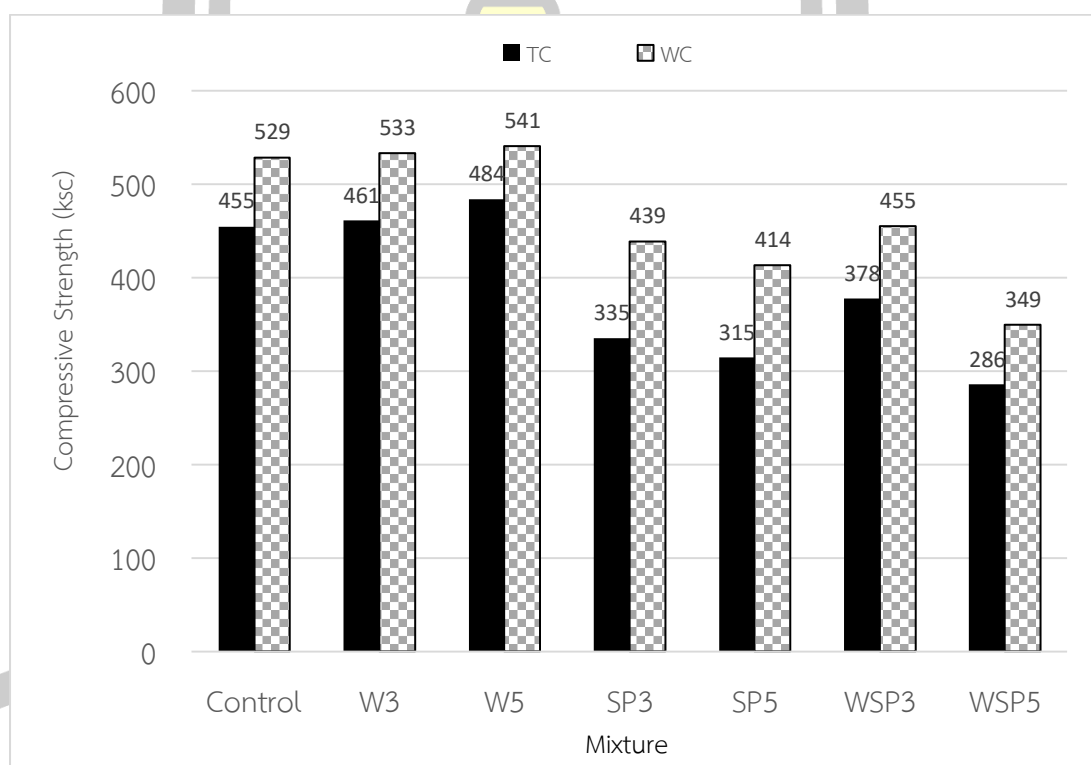


เปรียบเทียบวิธีการบ่มอุณหภูมิและบ่มน้ำ จากการเติมน้ำ สารลดน้ำพิเศษ และน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ ในส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ภาพประกอบ 24 เถ้าชานอ้อยดั้งเดิม อัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.55 ผลการทดสอบพบว่า การเติมน้ำส่งผลให้มีแนวโน้มต่อกำลังรับแรงอัดดีกว่า เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเติมน้ำใกล้เคียงกัน ได้แก่ W5 SP5 และ WSP3 ในการบ่มทั้งสองวิธี พบว่าการเติมน้ำหรือเติมน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษมีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเติมน้ำหรือเติมน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษกำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ผลจากการเติมน้ำหรือสารผสมเพิ่มในปริมาณร้อยละ 5-6 มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าอัตราส่วนที่ไม่เติม (Control) ในด้านการบ่มน้ำแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน (A/B เท่ากับ 0.55) เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาทำให้การเติมน้ำร้อยละ 3 ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการบ่มน้ำส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างต่อเนื่อง และเมื่อสังเกตจากราง 22 การบ่มด้วยอุณหภูมิ อายุทดสอบ 1TO ที่มีกำลังรับแรงอัดมากกว่า Control พบว่า อายุ 3 วัน มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่า Original และสามารถพัฒนากำลังสูงกว่าเมื่ออายุ 7 วัน ขึ้นไป ในการเติมน้ำผสมเพิ่มอื่น มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า Control ทุกอายุการทดสอบ และการบ่มน้ำ พบว่า 3W-OW มีกำลังสูงกว่า Control ทุกอายุทดสอบ ในด้าน 5W-OW และ 3SP-OW มีกำลังอัดสูงกว่า ในช่วง 3 วัน และต่ำกว่า Control เมื่ออายุ 7 วันขึ้นไป ทั้งนี้อาจเนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณปูนซีเมนต์สูง ทำให้อิทธิพลจากสารผสมเพิ่มส่งผลเพียงเล็กน้อย



ภาพประกอบ 24 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิม PC ร้อยละ 15 โดยเปรียบเทียบการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ จากวิธีการบ่มอุณหภูมิและบ่มน้ำที่อายุ 90 วัน

ภาพประกอบ 25 เถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ อัตราส่วน A/B เท่ากับ 0.50 พบว่าการเติมน้ำก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่หลังขั้นตอนผสม (Delay time) จนถึงอายุทดสอบ ส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดดีที่สุดจากการเติมน้ำร้อยละ 5 แตกต่างจากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมที่มีกำลังรับแรงอัดดีที่สุดจากการเติมน้ำร้อยละ 3 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเติมที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ W5 SP5 และ WSP3 พบว่าการเติมน้ำ น้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ และสารลดน้ำพิเศษ ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดตามลำดับ มีเพียงการเติมน้ำอย่างเดียวที่มีค่ากำลังรับแรงอัดดีกว่าอัตราที่ไม่เติม (Control) และเมื่อเปรียบเทียบการบ่มทั้งสองวิธียังเห็นได้ชัดว่าเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดได้ดีในการบ่มน้ำ จากตาราง 24 พบว่าการเติมน้ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่า Control ในทุกช่วงอายุทดสอบทั้งสองวิธีการบ่ม ตรงกันข้ามสารลดน้ำพิเศษส่งผลต่ำกว่า Control ทุกอายุทดสอบเช่นเดียวกัน



ภาพประกอบ 25 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ PC ร้อยละ 15 โดยเปรียบเทียบการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ จากวิธีการบ่มอุณหภูมิและบ่มน้ำที่อายุ 90 วัน

ดังนั้น พบว่าเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำมีกำลังรับแรงอัดที่ดีต่อการเติมน้ำมากกว่าสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Salami et al. (2016) ได้ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อย ด้วยการเติมน้ำ สารลดน้ำพิเศษ และน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ เมื่อสังเกตเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมการเติมน้ำส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อกำลังรับแรงอัด ทั้งนี้อาจเนื่องจาก

อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน ( $A/B = 0.55$ ) เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาแล้ว ด้านเถาขานอ้อยเผาชำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเติมน้ำ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน ( $A/B = 0.50$ ) อาจเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา เพียงใช้น้ำเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด เมื่อเปรียบเทียบเถาขานอ้อยดั้งเดิมอาจมีแนวโน้มคล้ายกับเถาขานอ้อยเผาชำเมื่อมีอัตราส่วนสารละลายเท่ากัน แต่ในการทดสอบนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ และเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษกลับพบว่าไม่มีความเหมาะสมต่อเถาขานอ้อยดั้งเดิมและเผาชำ

#### 4.4.7 ผลการเปลี่ยนแปลงวิธีการบ่ม

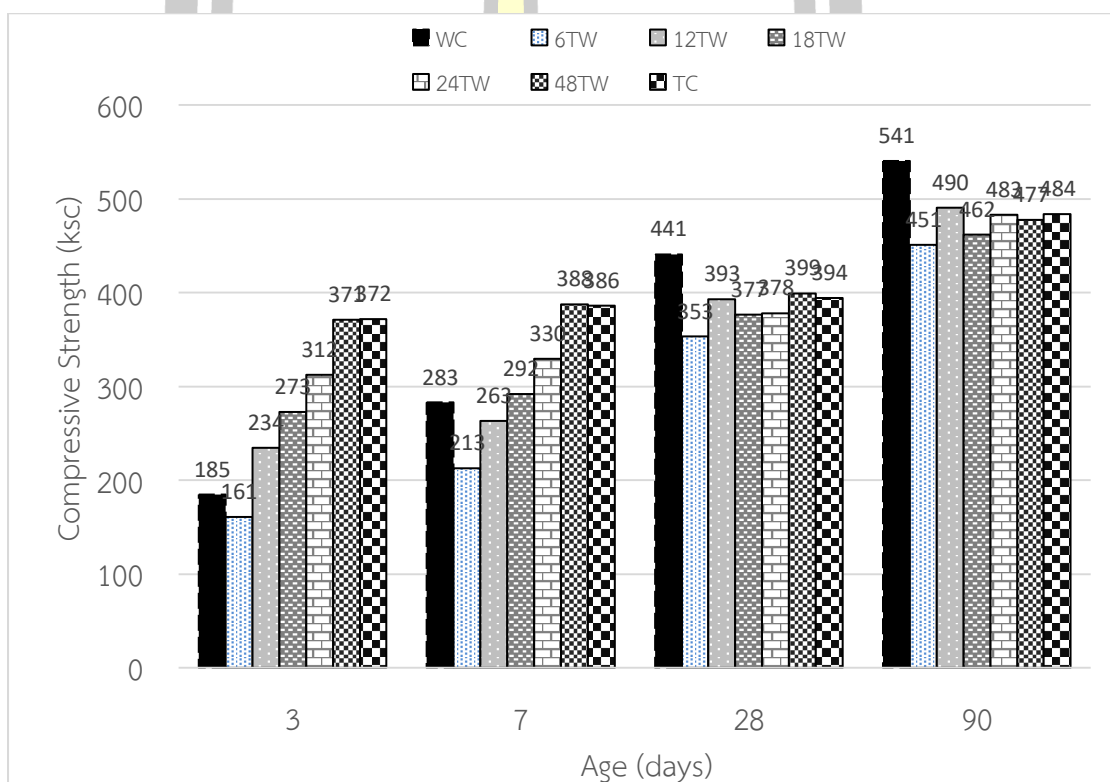
งานวิจัยนี้เป็นส่วนสุดท้าย โดยนำอัตราส่วนที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 90 วัน อันดับที่ 1 จากข้อ 4.4.5 สัดส่วนผสม 5W-RW จากนั้นเปลี่ยนแปลงกรรมวิธีการบ่มโดยรวมการบ่มที่ทำการศึกษาข้างต้นด้วยกัน คือ บ่มอุณหภูมิและบ่มน้ำ โดยเปลี่ยนแปลงการบ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 6 12 18 24 และ 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการบ่มน้ำจนกว่าจะถึงอายุทดสอบ เพื่อศึกษาอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ แสดงในตาราง 25 เนื่องจากการบ่มน้ำมีกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นตำจึงศึกษาหาปัจจัยในการพัฒนา

ตาราง 25 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากผลของการเปลี่ยนแปลงกรรมวิธีการบ่ม

ชื่อ สัดส่วน ผสม	ระยะเวลา บ่มอุณหภูมิ (ชม.)	การแทนที่ ปูนซีเมนต์ใน เถาขานอ้อย (ร้อยละ)	A/B	เติมน้ำ (ร้อยละ)	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
					3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
6TW	6	15	0.50	5	161	213	353	451
12TW	12	15	0.50	5	234	263	393	490
18TW	18	15	0.50	5	273	292	377	462
24TW	24	15	0.50	5	312	330	378	483
48TW	48	15	0.50	5	371	388	399	477

เปรียบเทียบระยะเวลาการบ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 6 12 18 24 และ 48 ชั่วโมงจากนั้นทำการบ่มน้ำจนครบอายุทดสอบ ในอัตราส่วนที่ดีที่สุด ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาในการบ่มอุณหภูมิในช่วงต้นมีผลอย่างมากในการพัฒนากำลังรับแรงอัด โดยมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาที่บ่มอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อมีอายุการทดสอบมากขึ้นจะเห็นว่าส่วนผสมที่บ่มอุณหภูมิมิระยะสั้นจะสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าส่วนผสมที่บ่มอุณหภูมิมิยาวและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงวิธีการบ่มกับวิธีบ่มน้ำ ตามภาพประกอบ 26 พบว่าการเปลี่ยนแปลงวิธีการบ่มไม่สามารถพัฒนากำลัง

รับแรงอัดในระยะยาวได้เท่าการบ่มน้ำ (541 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และเมื่อสังเกตการบ่ม อุณหภูมิเป็นเวลา 6 ชั่วโมงมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าการบ่มน้ำเพียงอย่างเดียว เนื่องจากความร้อนส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zou et al., (2018) ได้ศึกษาคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย โดยศึกษาวิธีการบ่มที่แตกต่าง ได้แก่ การบ่มน้ำ (B) และการบ่มไอน้ำ (Z) พบว่าการบ่มน้ำมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นแต่สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้มากที่สุดจากการบ่มทั้งหมดและการบ่มด้วยความร้อนส่งผลกระทบต่อพัฒนาการกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในระยะยาว (180 วัน)



ภาพประกอบ 26 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ PC ร้อยละ 15 จากการเปลี่ยนแปลงกรรมวิธีการบ่ม

#### 4.5 ต้นทุนการผลิตของไฮบริดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย

ต้นทุนการผลิตไฮบริดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเพื่อพิจารณาความคุ้มค่าในการนำไปพัฒนา โดยพิจารณาส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดอย่างน้อย 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นำส่วนผสมมอร์ตาร์ไปออกแบบเป็นคอนกรีตโดยการเติมมวลรวมหยาบ อัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียดสอดคล้องกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน (Bellum et al., 2019) ทำการ

เปรียบเทียบราคากับคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังรับแรงอัด 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยราคาต้นทุนแสดงในตาราง 26 พบว่าการผลิตไฮบริดจีโอโพลิเมอร์จำเป็นต้องใช้สารละลายอัลคาไลน์ ทำให้มีราคาต้นทุนสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบราคาต่อกำลังรับแรงอัดแล้ว ส่วนผสมที่มีราคาต่ำสุด ได้แก่ 15C50RW จากการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ และ A/B เท่ากับ 0.50 ด้วยวิธีการบ่มน้ำ คำนวณแล้วมีราคาต่อกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 8 บาทต่อ 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับราคาคอนกรีตควบคุม (Control) มากที่สุด รองลงมา 15C55OW โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 ด้วยการบ่มน้ำ โดยคำนวณแล้วมีราคาต่อกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 9 บาทต่อ 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าการเพิ่มปริมาณสารละลายและการบ่มที่อุณหภูมิส่งผลต่อราคาต้นทุนไฮบริดจีโอโพลิเมอร์ ทั้งนี้การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมมวลรวมหยาบเป็นเพียงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

ตาราง 26 ราคาไฮบริดจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยต่อลูกบาศก์เมตร

ชื่ออัตราส่วน	ปูนซีเมนต์ + เถ้าขานอ้อย (บาท)	มวลรวมละเอียด (บาท)	มวลรวมหยาบ (บาท)	สารละลาย (บาท)	อุณหภูมิ (บาท)	ราคา รวม (บาท)	ราคาต่อกำลัง (บาท/กก./ตร.ม.)
Control	-	-	-	-	-	2400	6
15C55OW	183	996	1191	2024	0	4393	9
10C50RT	277	996	1191	1840	200	4504	10
15C50RT	290	996	1191	1840	200	4516	10
15C55RT	290	996	1191	2024	200	4700	12
10C50RW	277	996	1191	1840	0	4304	9
10C55RW	277	996	1191	2024	0	4488	10
15C50RW	290	996	1191	1840	0	4316	8
15C55RW	290	996	1191	2024	0	4500	9
15C60RW	290	996	1191	2208	0	4684	11

ที่มา : บัญชีราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน, 2562

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์จากการศึกษาครั้งนี้และแนวทางการพัฒนางานวิจัยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย เพื่อพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ในงานคอนกรีตในด้านวัสดุก่อสร้าง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ผลการทดสอบในแต่ละหัวข้อการทดสอบ และนำมาสรุปได้ดังนี้

##### 1. ผลการแทนที่ของปูนซีเมนต์

- การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แต่ลดความสามารถในการทำงานได้ โดยการแทนที่ร้อยละ 10 มีความเหมาะสมในการพัฒนากำลังรับแรงอัดมากที่สุด

##### 2. การปรับปรุงคุณภาพเถ้าชานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ

- การปรับปรุงคุณภาพเถ้าชานอ้อยด้วยการเผาซ้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ดีขึ้น และยังช่วยให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้เถ้าชานอ้อยดั้งเดิม

##### 3. ผลของวิธีการบ่ม

- การบ่มจีโอโพลิเมอร์ ด้วยอุณหภูมิส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงตั้งแต่อายุต้น และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออายุตัวอย่างมากขึ้น ส่วนการบ่มน้ำกำลังรับแรงอัดต่ำในอายุต้น แต่กลับพัฒนาสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิในอายุ 28 วันขึ้นไป

##### 4. ผลการเติมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ

- การเติมน้ำเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ และมีผลต่อกำลังรับแรงอัดระยะเวลาการก่อตัวเพียงเล็กน้อย ส่วนการใช้สารลดน้ำพิเศษ จะยืดระยะเวลาการก่อตัว แต่ทำให้กำลังรับแรงอัดและระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยทั้งสองชนิดลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของการใช้เถ้าชานอ้อยเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์ในด้านความคงทนในด้านต่าง ๆ เช่น การหดตัวเมื่อแห้ง การต้านทานซัลเฟต การต้านทานต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น เพื่อพัฒนาการบ่มใช้งานในระยะเวลายาว
2. พัฒนาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นคอนกรีต ในการพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้าง
3. ปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ให้มีความเหมาะสม เช่น การเปลี่ยนเป็นทรายที่มีสภาวะอิมพัลฟ์เวนท์ (SSD) เปลี่ยนขั้นตอนการผลิตหรือลดระยะเวลาในการผสม เป็นต้น





## บรรณานุกรม

- กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักงานอำนวยการ สำนักงานคณะกรรมการศึกษาขั้นพื้นฐาน. (2562).  
ราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานสำหรับปีงบประมาณ พ.ศ. 2562.  
กองอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวง  
อุตสาหกรรม. (2560). สรุปลสถานการณ์อ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศ ประจำปีการผลิต  
2560/61.
- คาวี มนทการติวงศ์. (2548). ผลกระทบของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่มีผลต่อ  
กำลังอัดและความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
ธนบุรี.
- เจริญชัย ฤทธิรุท และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2550). จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากดินขาวระนองเผา.  
วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 34, (เมษายน), 231-242.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2551). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. ใน บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม  
จำกัด, 241-252.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2556). ปูนซีเมนต์. ใน คอนกรีตเทคโนโลยี, 9-24.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2555). การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจาก  
โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อวัสดุในงานคอนกรีต. ใน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, พิมพ์ครั้งที่ 2.
- นัฐภพ ถานะวุฒิพงศ์ และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2557). ผลกระทบเนื่องจากค่าการสูญเสียน้ำหนัก  
เนื่องจากการเผาที่มีต่อความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน กำลังและความทนทานของ  
คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าธนบุรี.
- นาทปิยะ แก้วศรีบุตร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2557) การศึกษาสมบัติของเถ้าขาน  
อ้อยจากหลายแหล่งเพื่อใช้ในการงานคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นันทชัย ชูศิลป์. (2552). การใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ. (2554). ผลของพลังงานไมโครเวฟต่อกำลังอัดและความ

- ทนทานของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปีที่ 34, 3, 279–298.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2553). เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). ศูนย์วิจัยและพัฒนา โครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. ใน สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.), 346.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2553). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. ใน สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.).
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และสันติสุข เชื้อมชัยตระกูล. (2539). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น 1(1): ม.ค.-มิ.ย.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และวราภรณ์ คุณาวานากิจ. (2005). สารจีโอโพลิเมอร์จาก เถ้าลอยแม่เมาะ. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 32, 5, 715-724.
- ปิติ สุขนธสุขกุล. (2556). คอนกรีต. ปทุมธานี : วรณกวี, พิมพ์ครั้งที่ 2, 9–29.
- ปิยะวัตร เกษร และสุทธิวัชร ฤทธิวัชร. (2560). การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสม เศษอะลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- เพ็ญชาย เวียงใต้ และเรืองรุชดี ชีระโรจน์. (2553). การศึกษาความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท 101. (2561). มาตรฐานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก. สำนัก วิศวกรรม วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, 92–108.
- วิฑิต พิทยธารารช และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2538). การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง ผสม ไมโครซิลิกา ซีเถ้าลอย และสารลดน้ำพิเศษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์. (2551). ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ต่างกันต่อกำลังอัดและการซึมผ่านคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- วรยศ วิฑูรีศานต์ และสหलग หอมวุฒิมวงศ์. (2556). การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อย

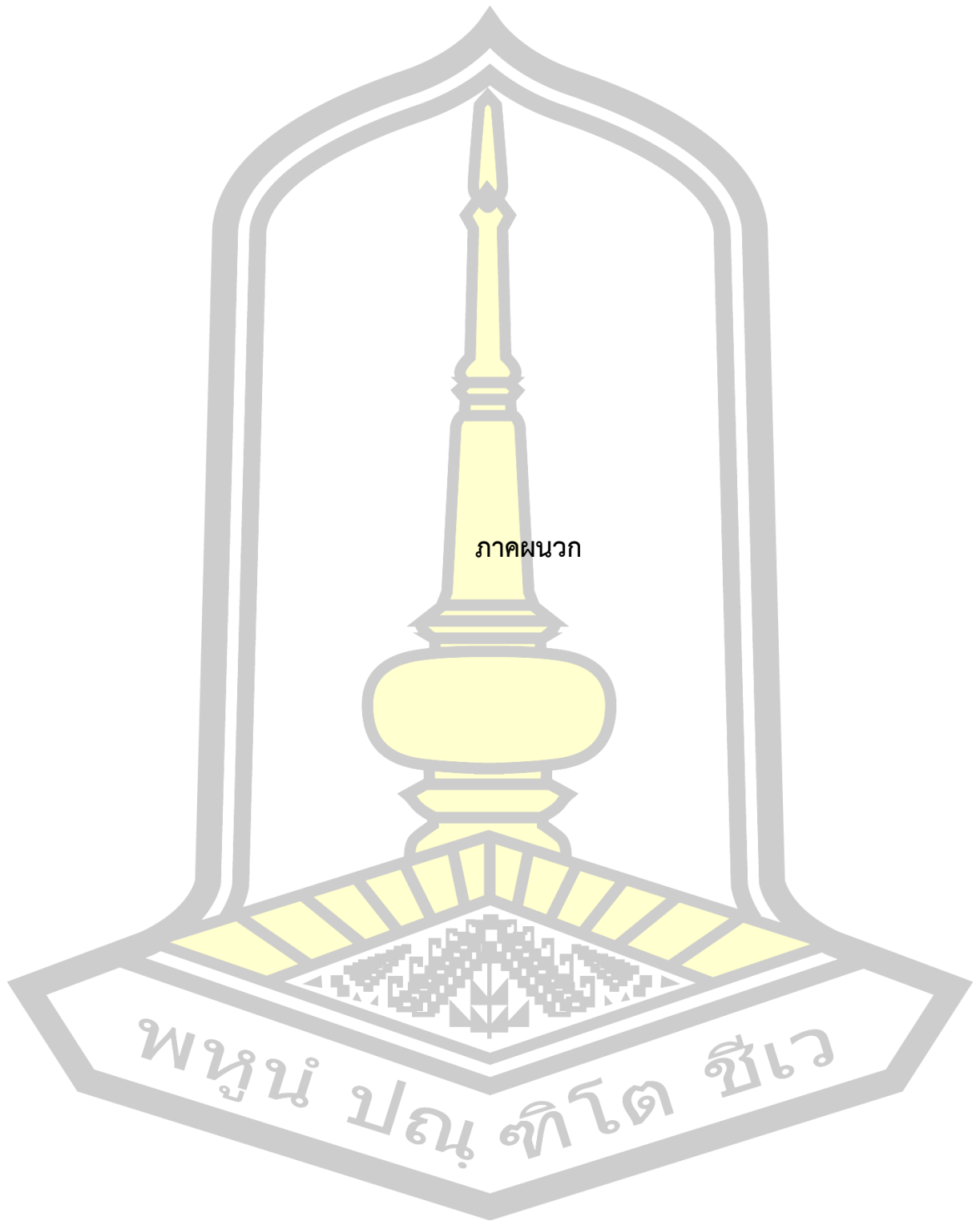
- ผสมตะกอนน้ำประปาเผา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ศักรินทร์ เหลืองกำจร. (2556). วัสดุจีโอโพลิเมอร์. วารสารคอนกรีต : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ และชูชัย สุจิวิกรกุล. (2548). ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, 11-18
- สหलग หอมวุฒิมังค์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2549). การศึกษากำลั้งอัดและค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำเร็จ รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม. (2553). การพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อย. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- อนุวัติ โยธากุล และสมหมาย ศรีสุธรรม. (2559). ปริมาณน้ำที่มีผลต่อกำลั้งรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์. (2551). ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด. ใน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). การศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 8, 2, 1-8.
- ACI Committee. (1989). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight and Mass Concrete, 1-38.
- American Society for Testing and Materials. (1997). ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in concrete. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02. Philadelphia. pp. 294-296.
- American Society for Testing and Materials. (2001). ASTM C 150 : Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.01. Philadelphia. pp. 149-155.
- Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash

- and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134–1147.
- Bellum, R. R., Nerella, R., Madduru, S. R. C., and Indukuri, C. S. R. (2019). Mix Design and Mechanical Properties of Fly Ash and GGBFS-Synthesized Alkali-Activated Concrete (AAC). *Infrastructures*, 4(2), 20.
- Davidovits J. (1999). Chemistry of Geopolymeric System Terminology in Geopolymer. *Proceeding of The International Conference, France*, 9–40.
- Davidovits J. (2008). *Geopolymer Chemistry & Applications*. 3<sup>rd</sup> edition. Institute Geopolymer, France.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., and Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer Technology. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.
- Gunasekara, C., Law, D. W., and Setunge, S. (2016). Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 124, 352–362.
- Hamdy K. S., Ahmed S. E. and Ahmed M. W. (2016). Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 126, 560-565.
- Langan, B. W., Weng, K., and Ward, M. A. (2002). Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1045–1051.
- Laskar, A. I. (2009). Correlating slump, slump flow, vebe and flow tests to rheological parameters of high-performance concrete. *Materials Research*, 12(1), 75–81.
- Mahya A., Zhong T., Georgius A. and Bijan S. (2018). Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 330-337.
- Mehta, A., and Siddique, R. (2017). Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash. *Construction and Building Materials*, 150, 792–807.
- Mindess S. (2001). *Lecture Note CIVIL 428-Concrete Technology*. University of British

Columbia, Canada.

- Nematollahi, B., and Sanjayan, J. (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Materials and Design*, 57, 667–672.
- Nevile A.M. (1995). *Properties of Concrete*. Longman.
- Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Kovalchuk, G., Ordoñez, L. M., and Naranjo, M. C. (2007). Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2958–2966.
- Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials and Design*, 53, 269–274.
- Pradip N. and Prabir K.S. (2015). Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement & Concrete Composites*, 55, 205-214.
- Ramachandran V.S. and Feldman R.F. (1995). *Cement Science. Concrete Admixtures Handbook*, William Andrew Publishing.
- Salami, B. A., Megat Johari, M. A., Ahmad, Z. A., and Maslehuddin, M. (2016). Impact of added water and superplasticizer on early compressive strength of selected mixtures of palm oil fuel ash-based engineered geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 109, 198–206.
- Singh, N.B., Singh, V.D. and Sarita, R. (2000). Hydration of Bagasse Ash-blended Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 30, 1485-1488.
- W. Czernin. (1962). *Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers*. Crosby Lockwood.
- Wisniak, J. (2003). Henry-Louis Le Chatelier. *The Significance of Applied Research*, 14(2), 105-116.
- Zou, C., Long, G., Ma, C., and Xie, Y. (2018). Effect of subsequent curing on surface permeability and compressive strength of steam-cured concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 424–432.

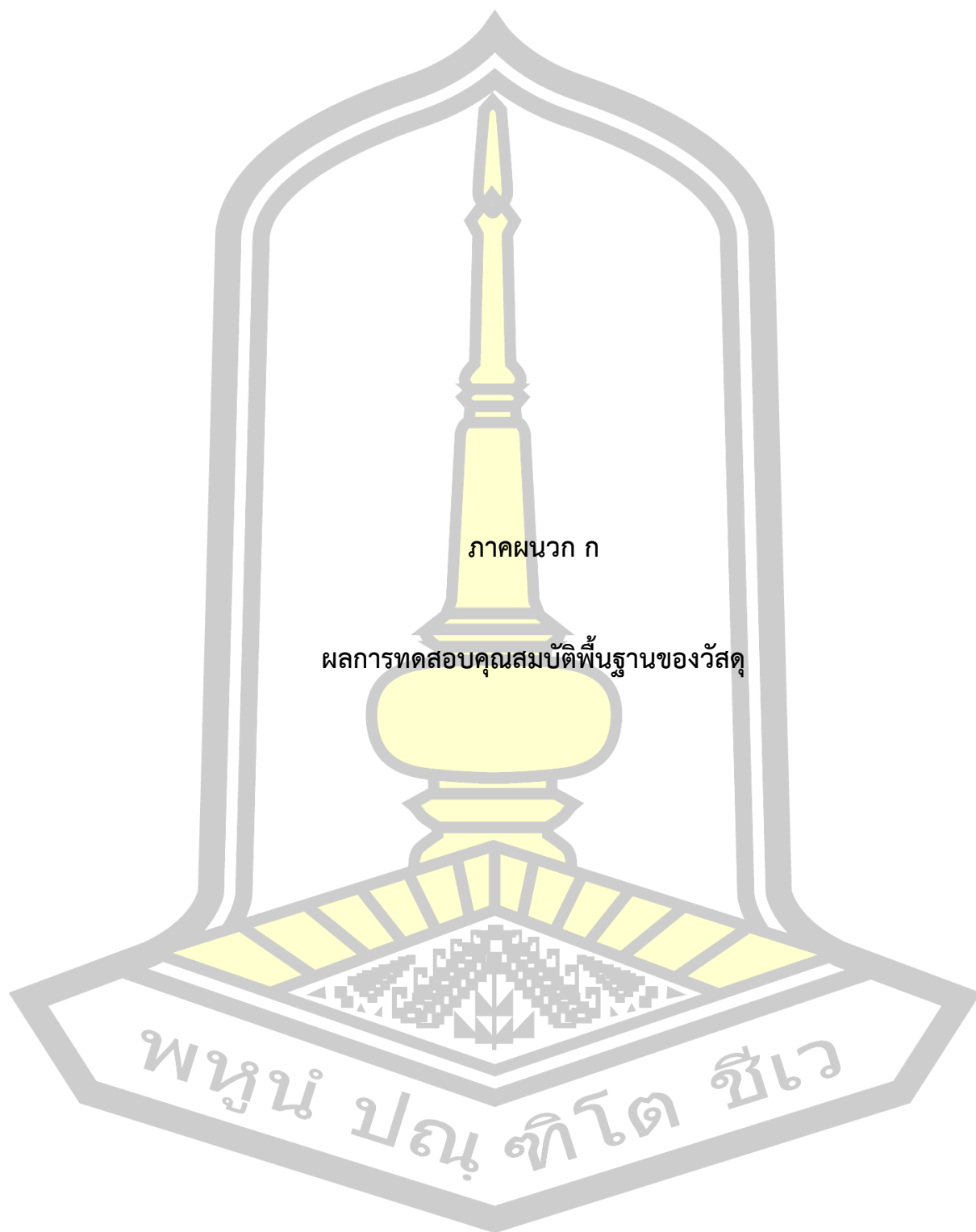




ภาคผนวก

พหุณฺ์ ปณฺุ ทิโต ชีเว





ตารางภาคผนวก ก.1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อยตั้งเดิม

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

ตารางภาคผนวก ก.2 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำ

รายการ	ผลทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	50
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ชม.)	-0.2
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ชม.)	19.65
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง (ลบ.ชม.)	19.85
ความถ่วงจำเพาะ	2.52

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	-

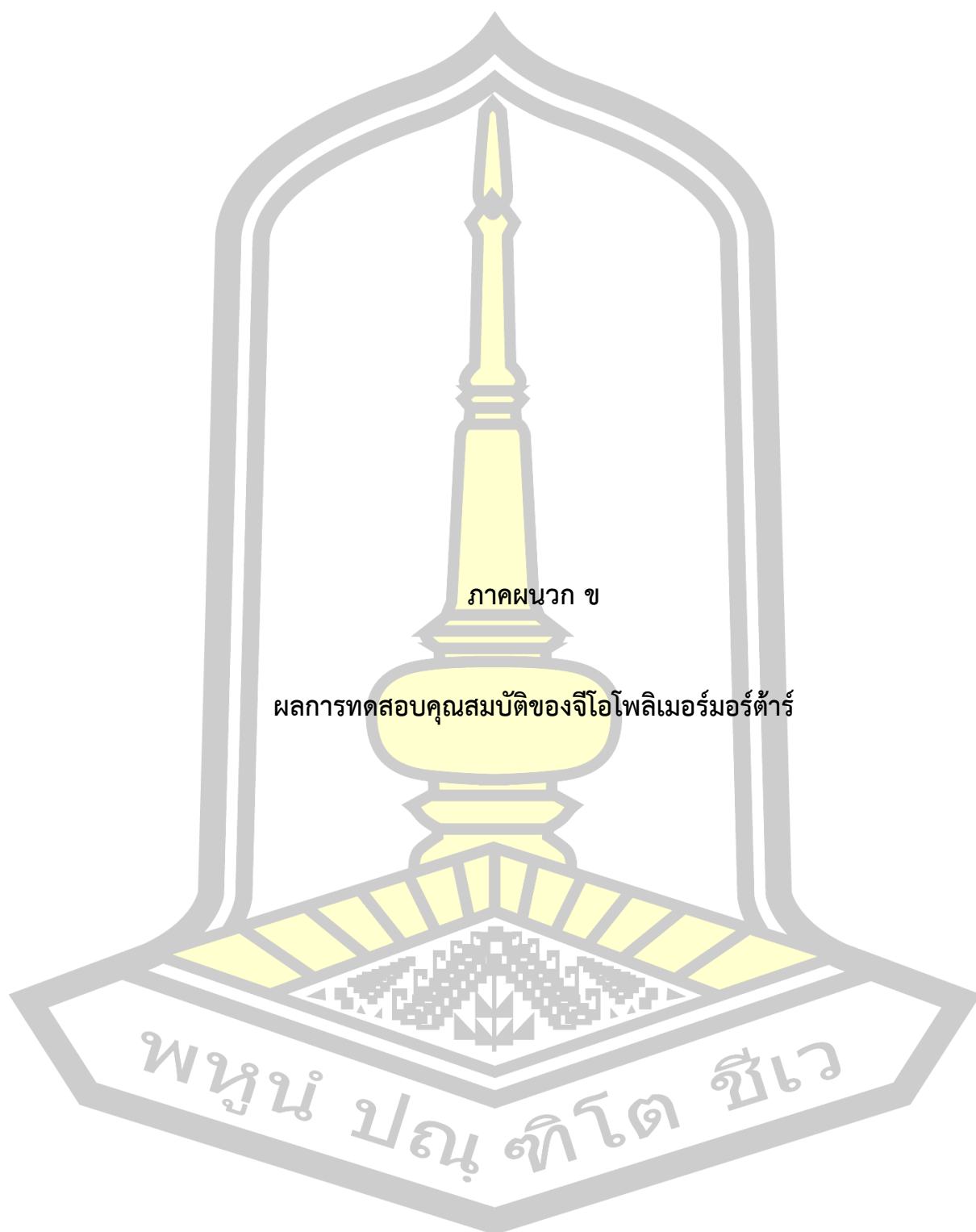
ตารางภาคผนวก ก.3 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (ต่อ)

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 ผลการทดสอบหาการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของทราย

ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องเปิดของตะแกรง (มม.)	น.น. ตะแกรง (กรัม)	น.น. ตะแกรง + น.น. ทราย (กรัม)	น.น. ทราย (กรัม)	ร้อยละทราย ค้างตะแกรง	ร้อยละทราย สะสม	ร้อยละทรายผ่านตะแกรง
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	

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ตารางภาคผนวก ข.1 การไหลผ่านของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิม

อัตราส่วนผสม	เส้นผ่านศูนย์กลาง หลังทดสอบ (ซม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ก่อนทดสอบ (ซม.)	ค่าการไหลผ่าน (ร้อยละ)
0CM50AB	11.67	9.91	17.73
0CM55AB	11.99	9.91	21.01
0CM60AB	13.93	9.91	40.51
5CM50AB	11.16	9.91	12.64
5CM55AB	11.72	9.91	18.26
5CM60AB	12.46	9.91	25.71
10CM50AB	10.67	9.91	7.64
10CM55AB	11.31	9.91	14.13
10CM60AB	11.84	9.91	19.45
15CM50AB	10.34	9.91	4.34
15CM55AB	10.77	9.91	8.63
15CM60AB	11.57	9.91	16.70

ตารางภาคผนวก ข.2 การไหลผ่านของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ

อัตราส่วนผสม	เส้นผ่านศูนย์กลาง หลังทดสอบ (ซม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ก่อนทดสอบ (ซม.)	ค่าการไหลผ่าน (ร้อยละ)
0CM50AB	12.14	9.91	22.53
0CM55AB	12.61	9.91	27.19
0CM60AB	16.90	9.91	70.56
5CM50AB	11.94	9.91	20.46
5CM55AB	12.40	9.91	25.10
5CM60AB	15.66	9.91	58.01
10CM50AB	11.35	9.91	14.48
10CM55AB	12.10	9.91	22.10
10CM60AB	14.49	9.91	46.19
15CM50AB	10.58	9.91	6.74
15CM55AB	11.50	9.91	16.08
15CM60AB	13.40	9.91	35.19

ตารางภาคผนวก ข.3 การไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำจากผล  
การเติมสารผสมเพิ่ม

อัตราส่วนผสม	เส้นผ่านศูนย์กลางหลัง ทดสอบ (ซม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางก่อน ทดสอบ (ซม.)	ค่าการไหลผ่าน (ร้อยละ)
3W0SP-OB	15.30	9.91	54.39
5W0SP-OB	16.18	9.91	63.22
0W3SP-OB	10.50	9.91	5.95
0W5SP-OB	10.74	9.91	8.35
3W3SP-OB	12.71	9.91	28.23
5W5SP-OB	14.05	9.91	41.73
3W0SP-RB	13.60	9.91	37.24
5W0SP-RB	14.88	9.91	50.10
0W3SP-RB	10.36	9.91	4.57
0W5SP-RB	10.64	9.91	7.34
3W3SP-RB	11.05	9.91	11.53
5W5SP-RB	12.16	9.91	22.65

ตารางภาคผนวก ข.4 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ

อัตราส่วนผสม	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (นาที)
0W0SP-OB	40	90
3W0SP-OB	48	90
5W0SP-OB	62	120
0W3SP-OB	72	150
0W5SP-OB	107	180
3W3SP-OB	65	135
5W5SP-OB	95	180
0W0SP-RB	31	75
3W0SP-RB	38	90
5W0SP-RB	42	90
0W3SP-RB	53	120
0W5SP-RB	56	135

ตารางภาคผนวก ข.4 ระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ (ต่อ)

อัตราส่วนผสม	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (นาที)
3W3SP-RB	51	120
5W5SP-RB	78	150

ตารางภาคผนวก ข.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมโดยไม่เติมปูนซีเมนต์จากการบ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละการแทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
0	อุณหภูมิตั้งแต่ 75 องศาเซลเซียส	0C500	1	51.82	54.91	132.26	204.19
			2	11.6	45.63	78.89	191.04
			3	61.88	54.91	75.8	191.82
			เฉลี่ย	41.77	51.82	95.65	195.68
		0C550	1	42.54	55.40	115.24	147.73
			2	47.18	52.92	66.52	189.49
			3	37.90	57.13	78.12	268.39
			เฉลี่ย	42.54	55.15	86.63	201.87
		0C600	1	15.47	21.66	51.82	141.3
			2	15.24	20.11	42.54	132.75
			3	14.70	27.84	48.73	145.02
			เฉลี่ย	15.14	23.20	51.82	139.69
	น้ำ	0C500	1	14.70	55.69	126.07	216.27
			2	10.05	46.41	129.94	205.24
			3	12.38	67.29	105.96	236.41
			เฉลี่ย	12.38	56.46	120.66	205.24*
		0C550	1	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	21.01	150.72
			2	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	72.21	100.49
			3	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	67.76	121.81
			เฉลี่ย	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	44.39	150.72*
0C600	1	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	23.98	116.32		
	2	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	24.75	105.97		
	3	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	23.98	106.57		
	เฉลี่ย	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	24.24	109.62		



ตารางภาคผนวก ข.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยดั้งเดิมจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 จากการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
5	อุณหภูมิ	5C500	1	208.06	177.89	196.45	311.7
			2	160.88	180.21	212.7	262.2
			3	145.41	190.27	208.83	231.26
			เฉลี่ย	171.45	182.79	205.99	268.39
		5C550	1	141.54	151.10	161.65	273.8
			2	138.45	167.18	164.74	228.94
			3	139.22	161.74	170.16	289.27
			เฉลี่ย	139.74	160.01	170.16	264.00
		5C600	1	143.86	150.82	169.38	215.22
			2	155.46	143.86	170.16	215.22
			3	138.45	141.54	167.84	218.7
			เฉลี่ย	138.45	145.41	169.13	216.38
	น้ำ	5C500	1	93.48	182.76	199.98	218.88
			2	90.76	191.66	181.89	177.89
			3	99.42	193.64	189.54	182.53
			เฉลี่ย	90.76	182.76	190.47	218.88
		5C550	1	50.20	93.98	123.28	134.17
			2	40.56	93.48	120.95	149.61
			3	46.74	35.86	146.95	167.66
			เฉลี่ย	45.83	93.73	130.39	167.66*
5C600	1	25.67	105.19	115.67	119.88		
	2	26.31	113.70	108.45	109.83		
	3	28.87	111.38	113.50	95.13		
	เฉลี่ย	26.95	105.19	112.54	119.88		

ตารางภาคผนวก ข.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิมจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 จากการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
10	อุณหภูมิ	10C500	1	327.17	322.53	378.21	280.76
			2	288.49	337.22	349.6	368.12
			3	330.26	338	313.25	360.79
			เฉลี่ย	315.31	332.58	347.02	364.46
		10C550	1	200.32	310.62	290.04	330.26
			2	215.02	236.92	287.72	276.12
			3	201.10	272.78	296.95	338.77
			เฉลี่ย	205.48	254.85	291.57	334.52
		10C600	1	194.91	260.65	220.53	257.55
			2	196.45	198.78	232.69	261.18
			3	189.49	219.66	265.37	251.76
			เฉลี่ย	193.62	226.36	239.53	256.83
	น้ำ	10C500	1	125.38	213.67	257.20	358.10
			2	121.92	227.27	277.60	352.69
			3	95.96	191.42	275.99	295.46
			เฉลี่ย	114.42	210.79	270.26	335.42
		10C550	1	77.90	179.79	287.03	334.35
			2	77.16	170.89	271.21	356.74
			3	78.64	172.62	245.85	344.28
			เฉลี่ย	77.90	174.43	268.03	356.74
10C600	1	91.75	189.93	217.15	247.50		
	2	90.76	167.43	221.26	249.82		
	3	98.18	212.93	220.01	269.16		
	เฉลี่ย	93.56	190.10	219.47	255.49		

ตารางภาคผนวก ข.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยดั้งเดิมจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
15	อุณหภูมิ	15C500	1	235.9	273.8	308.05	319.43
			2	233.58	290.82	293.05	251.37
			3	256.78	232.81	281.01	285.4
			เฉลี่ย	242.09	265.81	294.04	319.43
		15C550	1	271.48	286.17	393.68	381.31
			2	313.25	334.13	347.28	373.07
			3	324.07	358.10	378.63	371.25
			เฉลี่ย	292.37	310.15	347.28	381.31
		15C600	1	266.84	334.13	351.14	321.36
			2	301.64	332.58	330.70	306.27
			3	351.92	338.77	334.25	342.24
			เฉลี่ย	306.80	335.16	338.70	342.24
	น้ำ	15C500	1	124.75	198.78	229.25	312.74
			2	102.09	248.28	237.45	306.64
			3	23.74	63.56	241.31	312.45
			เฉลี่ย	113.42	223.53	241.31	310.61
		15C550	1	127.12	254.23	406.06	450.80
			2	133.05	271.79	417.89	438.14
			3	132.06	304.93	483.84	500.18
			เฉลี่ย	130.74	254.23	411.98	476.99
15C600	1	143.44	233.21	289.88	275.35		
	2	122.91	276.74	288.17	341.09		
	3	134.54	295.28	314.07	347.28		
	เฉลี่ย	128.72	254.97	289.03	344.19		

ตารางภาคผนวก ข.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำโดยไม่เติมปูนซีเมนต์จากการบ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละการแทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
0	อุณหภูมิ	OC50R	1	114.47	126.07	154.69	317.54
			2	102.09	99.77	140.77	230.49
			3	125.3	116.02	172.48	242.11
			เฉลี่ย	113.95	121.05	155.98	263.38
		OC55R	1	41.30	68.84	179.44	262.9
			2	41.14	48.73	192.59	257.2
			3	49.27	72.70	192.59	233.46
			เฉลี่ย	43.90	63.42	188.21	251.19
		OC60R	1	27.07	27.07	61.88	118.71
			2	40.99	30.94	54.91	75.68
			3	27.84	32.48	50.45	121.18
			เฉลี่ย	31.97	32.48	61.88	105.19
	น้ำ	OC50R	1	13.60	46.74	231.41	232.53
			2	13.60	18.30	171.63	232.42
			3	12.61	74.69	181.02	242.03
			เฉลี่ย	13.27	74.69	194.69	237.28
		OC55R	1	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	34.03	216.18
			2	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	36.35	197.73
			3	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	52.59	204.03
			เฉลี่ย	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	52.59	205.98
OC60R	1	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	40.22	92.04		
	2	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	40.99	85.85		
	3	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	34.03	101.32		
	เฉลี่ย	ไม่แข็งตัว	ไม่แข็งตัว	38.41	93.07		

ตารางภาคผนวก ข.10 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 จากการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
5	อุณหภูมิ	5C50R	1	194.13	197.23	229.71	358.35
			2	199.5	177.12	216.56	357.11
			3	183.31	202.64	251.37	379.86
			เฉลี่ย	192.31	202.64	232.55	365.11
		5C55R	1	186.40	238.22	227.39	313.12
			2	192.59	216.56	204.96	280.84
			3	199.55	201.87	237.45	312.1
			เฉลี่ย	189.50	201.87	223.27	312.61
		5C60R	1	88.95	78.12	107.51	170.89
			2	105.19	61.10	71.93	160.76
			3	117.56	102.87	90.49	167.92
			เฉลี่ย	88.95	102.87	107.51	166.52
	น้ำ	5C50R	1	92.81	180.21	271.48	314.79
			2	88.17	170.16	279.99	279.99
			3	87.40	178.67	275.35	317.89
			เฉลี่ย	92.81	180.21	279.99	304.22
		5C55R	1	77.34	96.68	252.92	247.50
			2	64.20	93.59	241.31	228.94
			3	78.89	95.13	236.67	228.17
			เฉลี่ย	73.48	95.14	243.63	247.50
5C60R	1	38.67	86.63	123.75	112.92		
	2	32.48	87.40	117.56	116.79		
	3	44.09	95.13	100.55	105.19		
	เฉลี่ย	38.41	89.72	113.95	116.79		

ตารางภาคผนวก ข.11 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 จากการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
10	อุณหภูมิ	10C50R	1	310.98	320.98	311.7	434.33
			2	319.54	332.58	349.54	443.88
			3	315.62	320.98	300.87	447.31
			เฉลี่ย	310.98	320.98	349.54	441.84
		10C55R	1	231.26	267.61	300.10	406.82
			2	213.47	238.99	279.99	357.69
			3	221.98	253.69	293.91	397.11
			เฉลี่ย	231.26	260.65	300.10	387.21
		10C60R	1	218.88	216.56	283.36	302.09
			2	242.09	228.17	264.07	269.92
			3	204.19	203.42	248.18	285.64
			เฉลี่ย	204.19	216.05	265.20	302.09
	น้ำ	10C50R	1	122.98	211.15	399.10	456.33
			2	123.75	235.90	331.03	410.70
			3	124.52	242.09	328.71	487.27
			เฉลี่ย	123.75	229.71	352.95	471.80
		10C55R	1	145.41	172.48	407.61	383.63
			2	147.73	188.72	420.75	431.58
			3	153.92	188.72	423.07	395.23
			เฉลี่ย	145.41	183.31	414.18	431.58
10C60R	1	58.78	112.92	193.36	244.41		
	2	48.73	154.69	227.39	212.70		
	3	49.50	125.30	190.27	255.24		
	เฉลี่ย	52.34	130.97	203.67	249.83		

ตารางภาคผนวก ข.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
15	อุณหภูมิ	15C50R	1	304.74	317.89	324.85	580.12
			2	317.11	331.03	350.37	586.86
			3	308.6	259.88	371.25	565.59
			เฉลี่ย	317.11	324.46	371.25	459.44
		15C55R	1	249.82	319.94	250.60	375.66
			2	294.68	321.31	273.80	404.84
			3	145.41	325.95	368.16	314.33
			เฉลี่ย	294.68	322.40	368.16	404.84
		15C60R	1	239.77	265.29	318.66	319.52
			2	217.34	230.49	289.27	313.34
			3	210.38	232.03	309.38	351.92
			เฉลี่ย	228.56	242.60	305.77	351.92
	น้ำ	15C50R	1	136.90	244.13	391.36	519.75
			2	138.45	243.36	283.85	537.54
			3	136.13	240.29	439.32	484.95
			เฉลี่ย	137.16	242.59	415.34	528.65
		15C55R	1	143.09	231.89	448.60	525.17
			2	122.20	276.25	384.40	445.50
			3	147.73	255.07	407.61	473.35
			เฉลี่ย	147.73	254.40	448.60	499.26
15C60R	1	117.56	226.62	246.73	442.41		
	2	111.38	242.09	308.60	417.66		
	3	116.79	234.35	329.49	453.24		
	เฉลี่ย	115.24	238.22	319.05	437.77		



ตารางภาคผนวก ข.13 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยดั้งเดิมจากผลการ  
 เติมสารผสมเพิ่ม ด้วยการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
15	อุณหภูมิ	3W	1	206.51	222.75	378.21	417.48
			2	351.92	404.51	382.08	400.64
			3	261.42	271.48	391.31	416.95
			เฉลี่ย	261.42	338.00	383.87	411.68
		5W	1	152.37	204.19	287.17	317.34
			2	229.71	290.04	270.16	319.16
			3	241.31	232.03	291.81	328.39
			เฉลี่ย	207.80	242.09	283.05	321.63
		3SP	1	275.35	297.00	317.89	306.28
			2	281.53	288.49	320.98	340.54
			3	275.35	283.85	305.51	332.25
			เฉลี่ย	277.41	289.78	314.79	326.36
		5SP	1	211.15	172.48	238.22	279.99
			2	182.53	210.38	197.23	265.02
			3	150.82	192.59	225.85	264.91
			เฉลี่ย	196.84	210.38	232.04	269.97
		3WSP	1	213.47	244.41	236.67	304.46
			2	246.73	253.69	277.12	308.33
			3	210.38	269.93	273.8	320.71
			เฉลี่ย	246.73	256.01	275.46	311.17
5WSP	1	179.44	210.38	134.58	241.10		
	2	196.45	187.17	197.23	230.21		
	3	174.80	122.20	191.04	236.40		
	เฉลี่ย	183.56	187.17	194.14	235.90		

ตารางภาคผนวก ข.14 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขาน้อยดั้งเดิมจากผลการ  
 เติมสารผสมเพิ่ม ด้วยการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
15	น้ำ	3W	1	180.27	308.60	437.00	488.83
			2	177.12	257.56	392.91	498.43
			3	180.27	282.31	382.86	477.61
			เฉลี่ย	179.22	295.46	414.96	488.29
		5W	1	146.18	183.97	388.27	427.78
			2	167.84	195.57	358.10	400.27
			3	148.50	222.64	319.43	413.52
			เฉลี่ย	154.17	222.64	373.19	413.86
		3SP	1	119.88	156.24	406.06	450.21
			2	158.56	157.01	330.26	427.94
			3	137.67	221.10	414.57	438.32
			เฉลี่ย	138.70	221.10	406.06	438.82
		5SP	1	140.77	208.83	275.35	317.11
			2	103.64	191.81	244.41	328.12
			3	110.60	177.12	275.35	331.61
			เฉลี่ย	118.34	200.32	275.35	324.95
		3WSP	1	133.03	179.44	379.50	364.07
			2	117.56	211.15	337.22	379.43
			3	124.52	205.74	279.99	376.89
			เฉลี่ย	133.03	208.45	358.36	373.46
5WSP	1	76.57	139.99	173.25	288.49		
	2	72.70	128.39	248.28	327.23		
	3	81.99	125.30	252.14	292.59		
	เฉลี่ย	77.09	131.23	250.21	302.77		

ตารางภาคผนวก ข.15 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากการบ่มอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

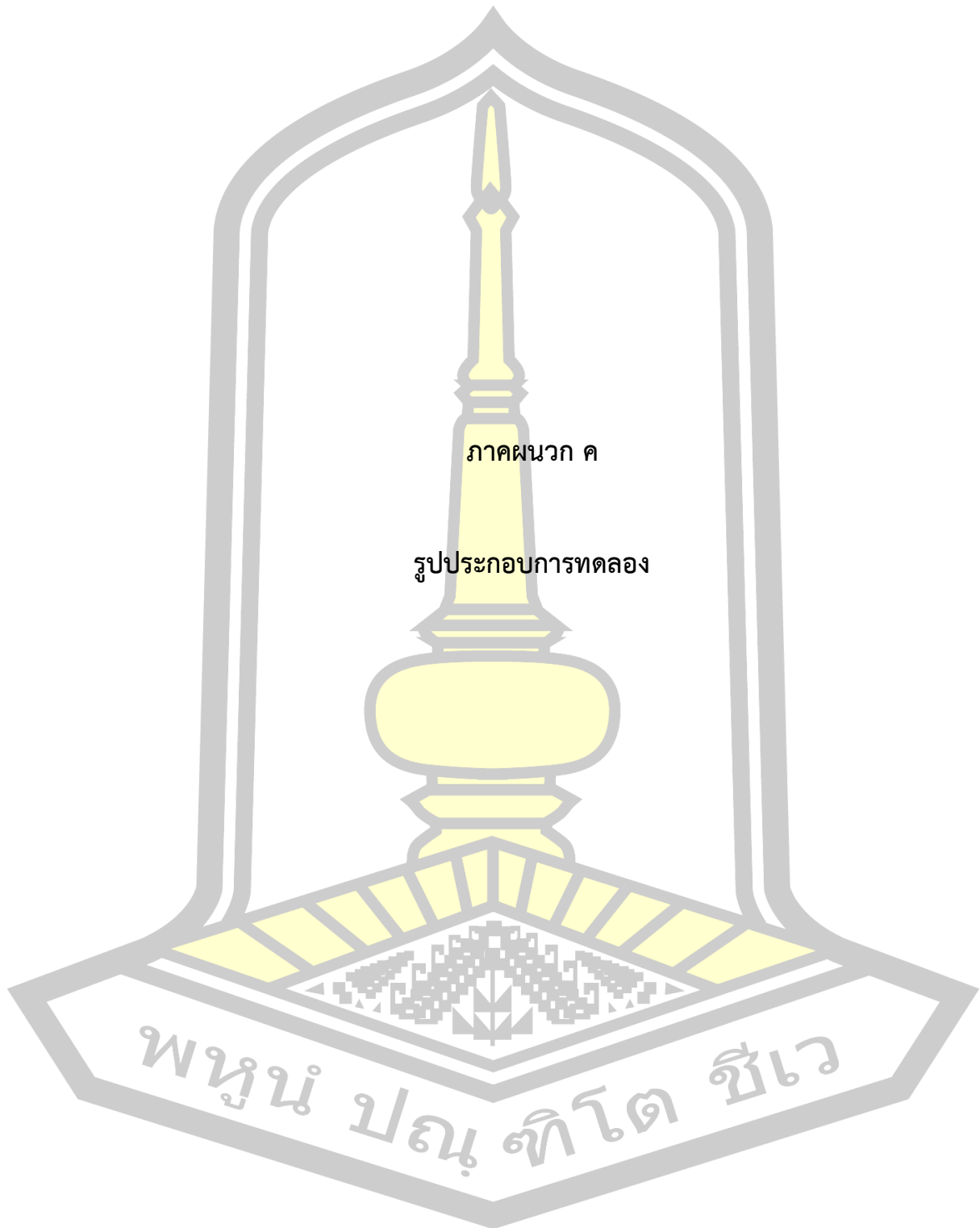
ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
15	อุณหภูมิ	3W	1	311.7	310.92	362.58	463.19
			2	334.24	336.45	315.57	466.61
			3	299.32	279.21	367.94	453.46
			เฉลี่ย	322.97	336.45	365.26	461.09
		5W	1	363.52	400.64	389.04	498.49
			2	397.55	376.67	399.87	468.6
			3	355.01	381.31	365.84	485.39
			เฉลี่ย	372.03	386.21	394.46	484.16
		3SP	1	246.73	245.96	264.19	322.75
			2	220.43	255.24	292.03	358.33
			3	250.60	260.65	289.71	325.07
			เฉลี่ย	239.25	253.95	281.98	335.38
		5SP	1	210.38	225.85	249.05	286.4
			2	208.83	225.07	241.24	330.49
			3	197.23	183.31	252.37	326.62
			เฉลี่ย	205.48	225.46	249.05	314.50
		3WSP	1	245.18	211.92	286.4	388.45
			2	198	243.64	309.6	368.5
			3	254.46	241.31	270.16	375.85
			เฉลี่ย	232.55	242.48	270.16	377.60
		5WSP	1	166.29	192.59	205.74	290.27
			2	203.42	194.91	170.93	280.21
			3	184.08	202.64	188.72	286.4
			เฉลี่ย	184.86	196.71	205.74	285.63

ตารางภาคผนวก ข.16 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	การบ่ม	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
15	น้ำ	3W	1	171.81	244.41	299.32	523.07
			2	174.80	212.59	405.89	524.08
			3	163.42	258.22	440.09	533.79
			เฉลี่ย	170.01	251.32	422.99	532.98
		5W	1	142.31	288.28	440.86	460.20
			2	184.85	277.56	392.14	528.21
			3	153.92	243.47	391.36	552.90
			เฉลี่ย	184.85	282.92	440.86	540.56
		3SP	1	136.90	256.01	331.03	419.21
			2	129.17	250.60	355.01	410.92
			3	134.58	232.81	403.74	486.72
			เฉลี่ย	129.17	246.47	379.38	438.95
		5SP	1	81.99	188.72	336.45	398.55
			2	108.28	182.53	246.73	423.30
			3	70.38	175.57	332.58	418.66
			เฉลี่ย	95.14	182.27	334.52	413.50
		3WSP	1	102.09	211.15	362.75	446.00
			2	97.45	217.34	238.22	455.28
			3	99.00	143.09	273.80	464.57
			เฉลี่ย	99.51	214.25	362.75	455.28
5WSP	1	92.81	158.56	310.92	340.10		
	2	88.95	147.43	339.54	348.05		
	3	130.71	182.53	331.03	360.10		
	เฉลี่ย	90.88	170.55	310.92	349.42		

ตารางภาคผนวก ข.17 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำจากการ  
แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 จากการบ่มน้ำ

ร้อยละ การ แทนที่	ระยะเวลาบ่ม อุณหภูมิ (ชม.)	สัดส่วนผสม	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			
				3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
15	6	6TW	1	166.90	202.42	358.33	426.31
			2	167.62	210.99	376.12	453.46
			3	154.52	215.13	324.85	474.35
			เฉลี่ย	160.71	213.06	353.10	451.37
	12	12TW	1	233.58	256.78	409.38	477.33
			2	220.43	251.21	370.71	497.66
			3	235.13	269.77	399.38	496.11
			เฉลี่ย	234.36	263.28	393.16	490.37
	18	18TW	1	283.08	291.04	390.82	468.93
			2	262.2	293.36	377.56	457.61
			3	249.05	254.46	361.37	459.65
			เฉลี่ย	272.64	292.20	376.58	462.06
	24	24TW	1	315.57	293.14	369.16	489.04
			2	295.46	334.08	374.96	479.79
			3	309.38	325.46	390.82	477.44
			เฉลี่ย	312.48	329.77	378.31	483.24
	48	48TW	1	380.21	381.53	395.29	483.63
			2	376.35	393.91	385.24	488
			3	356.24	325.07	417.11	460.43
			เฉลี่ย	370.93	387.72	399.21	477.35





ภาพประกอบ ค 1 เตาเผาอุณหภูมิสูง



ภาพประกอบ ค 2 เครื่อง UTM 300 ตัน





ภาพประกอบ ค 3 เครื่องบดแบบตกรกระทบ



ภาพประกอบ ค 4 ชุดทดสอบหาค่าการดูดซึ่มของทราย



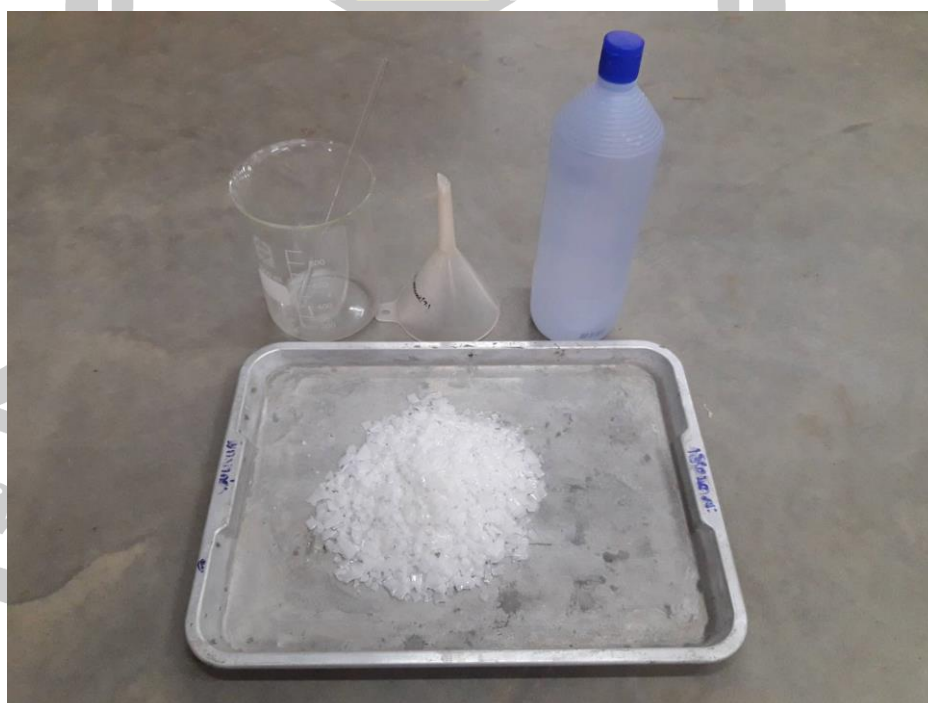
ภาพประกอบ ค 5 ถ้ำซานอ้อยดั้งเดิมที่ผ่านการบดละเอียด



ภาพประกอบ ค 6 ถ้ำซานอ้อยเผาซ้ำที่ผ่านการบดละเอียด



ภาพประกอบ ค 7 ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย



ภาพประกอบ ค 8 อุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ภาพประกอบ ค 9 ชุดทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย



ภาพประกอบ ค 10 ชุดทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์





ภาพประกอบ ค 11 ชุดทดสอบหาขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรง



ภาพประกอบ ค 12 การผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยใช้เครื่องผสมมอร์ตาร์



ภาพประกอบ ค 13 จีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จ



ภาพประกอบ ค 14 ลักษณะจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่แกะออกจากแบบหล่อ





ภาพประกอบ ค 15 การทดสอบกำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่าง



ภาพประกอบ ค 16 ลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่าง

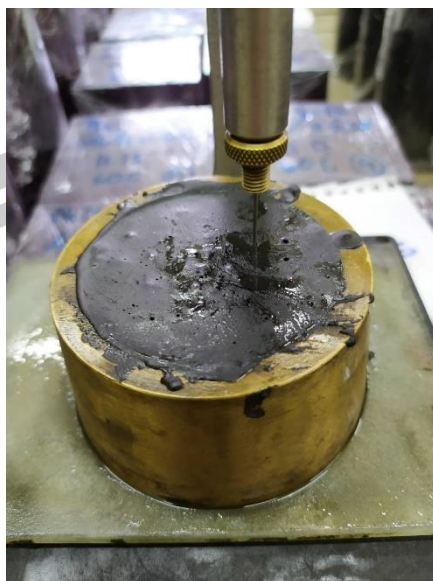




ภาพประกอบ ค 17 ทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



ภาพประกอบ ค 18 ชุดเครื่องมือทดสอบไวแคต Vicat Apparatus



ภาพประกอบ ค 19 ทดสอบหาระยะการก่อดำเริ่มต้นและก่อดำสุดท้าย โดยเข็มไวแคต



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวริษฐ์ หิรัญภัทรโรจน์
วันเกิด	วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด	อำเภอ เมือง จังหวัด มุกดาหาร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 345 หมู่ 1 อำเภอเลิงนกทา จังหวัด ยโสธร รหัสไปรษณีย์ 35120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนเลิงนกทา จังหวัดยโสธร พ.ศ. 2559 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรม โยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว