



การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ทำจากเถ้าขานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียม

วิทยานิพนธ์
ของ
พิพรรณ อินปลัด

พหุฯ ปทุมโต สีเว

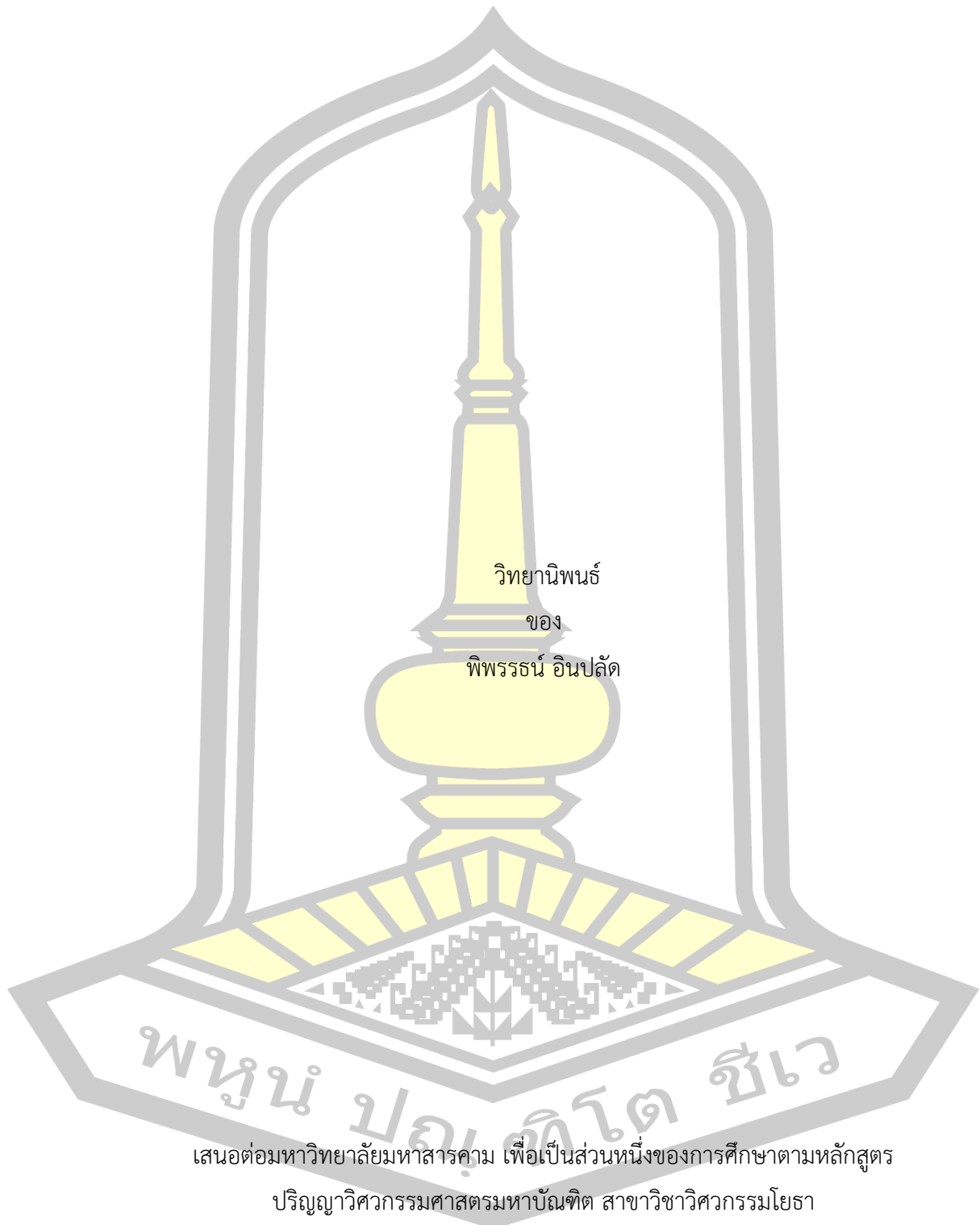
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ทำจากเถ้าขานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียม



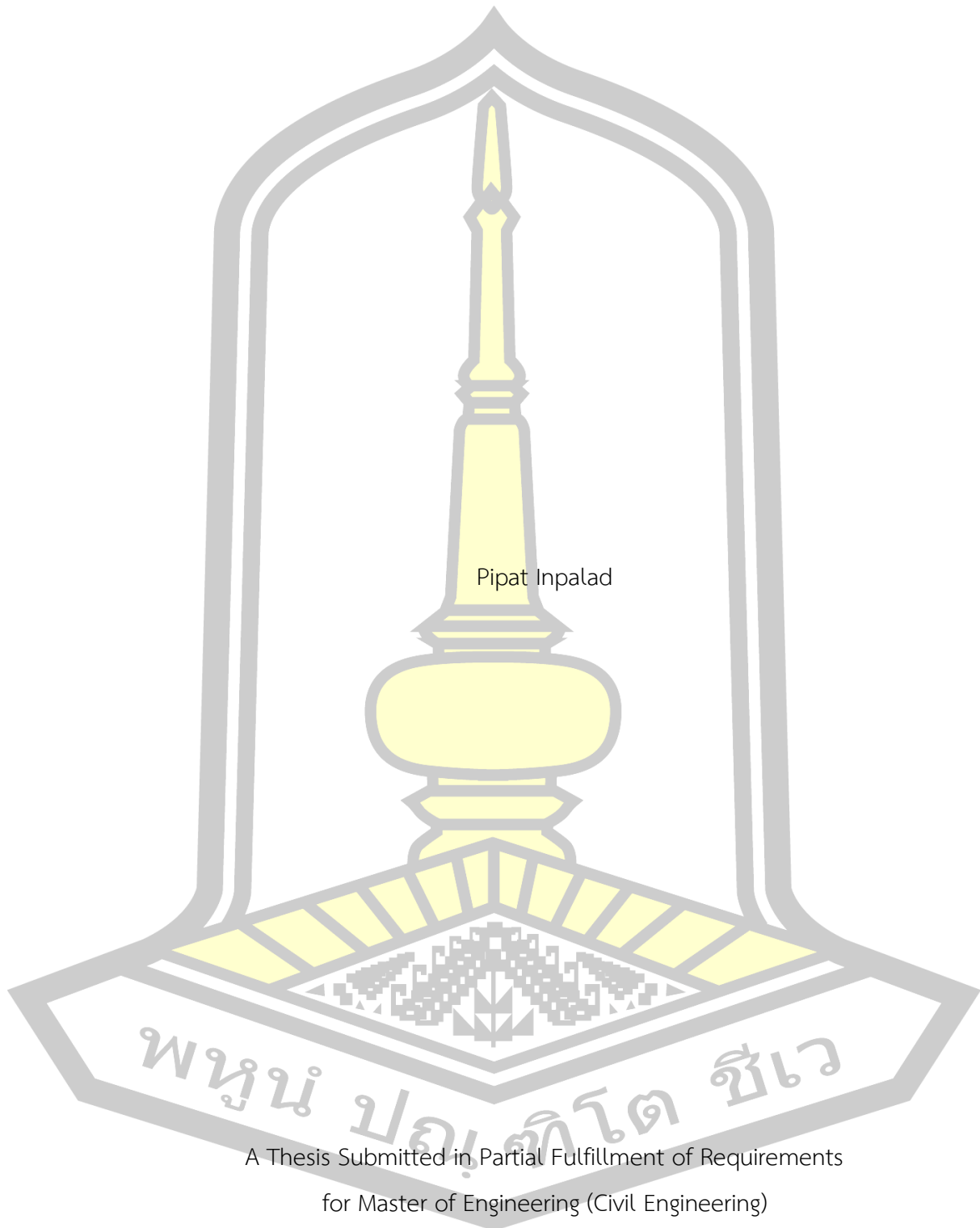
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Bagasse Ash Based Geopolymer Concrete with Aluminium Waste



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

June 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายพิพรรณ อินปลัด
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สหलग หอมวุฒิม่วงศ์)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม)

..... กรรมการ

(รศ. ดร. เรืองรุชต์ ชีระโรจน์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

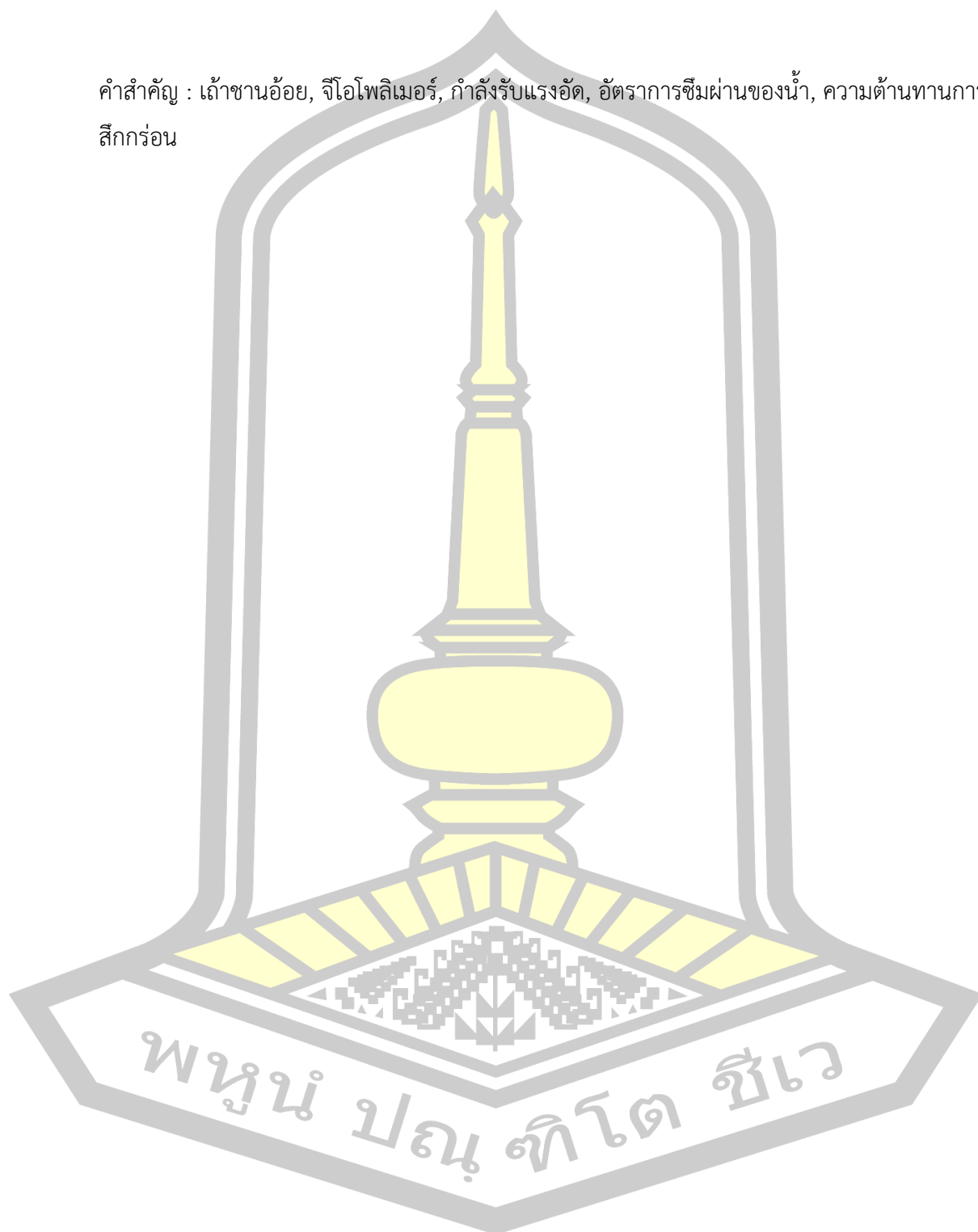
ชื่อเรื่อง การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ทำจากเถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม
ผู้วิจัย พิศรธรณ์ อินปลัด
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลมาเป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เถ้าชานอ้อยจาก 2 แหล่ง ถูกนำมาปรับปรุงความละเอียดด้วยการบด เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของอลูมินาที่ค่อนข้างต่ำ จึงนำเศษอะลูมิเนียมที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อสร้างมาเติมอลูมินาในจีโอโพลิเมอร์ โดยแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0-1.0 โดยน้ำหนัก แปรผันอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) อยู่ในช่วง 0.50-0.65 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง 40-100 องศาเซลเซียส ใช้หินปูนย่อยและกรวดเป็นวัสดุผสมรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต รวมถึงศึกษาผลจากการเผาเถ้าชานอ้อยก่อนนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าแหล่งของเถ้าชานอ้อยนั้นมีผลอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต การแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 145 อัตราส่วน AL/BA ที่มีค่าต่ำมีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดสูงแต่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตต่ำลง การบ่มที่อุณหภูมิสูงทำให้กำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในระดับอุณหภูมิต่ำ สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีเทียบเคียงการบ่มด้วยอุณหภูมิสูง วัสดุผสมรวมหยาบมีผลต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอนุภาคมวลรวมส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต และผลจากการปรับปรุงเถ้าชานอ้อยด้วยการเผาทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยเผาเข้าผสมเศษอะลูมิเนียม เท่ากับ 323 และ 458 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพบว่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงอัด โดยคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำ และจากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานการสึกกร่อนพบว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงจะมีค่าการสึกกร่อนต่ำ ยกเว้นคอนกรีตที่ใช้กรวดในส่วนผสม เนื่องจากผิวของกรวดมีลักษณะเรียบและโค้งมน ลดแรงเสียดทานได้ดี อีกทั้งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BA ต่ำ มีกำลังรับแรงอัดสูงแต่ความ

ตำนานการสีกร่อนต่ำ

คำสำคัญ : เถ้าขานอ้อย, จีโอโพลิเมอร์, กำลังรับแรงอัด, อัตราการซึมผ่านของน้ำ, ความต้านทานการสีกร่อน



TITLE Development of Bagasse Ash Based Geopolymer Concrete with Aluminium Waste

AUTHOR Pipat Inpalad

ADVISORS Associate Professor Sahalaph Homwouttiwong , Ph.D.

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

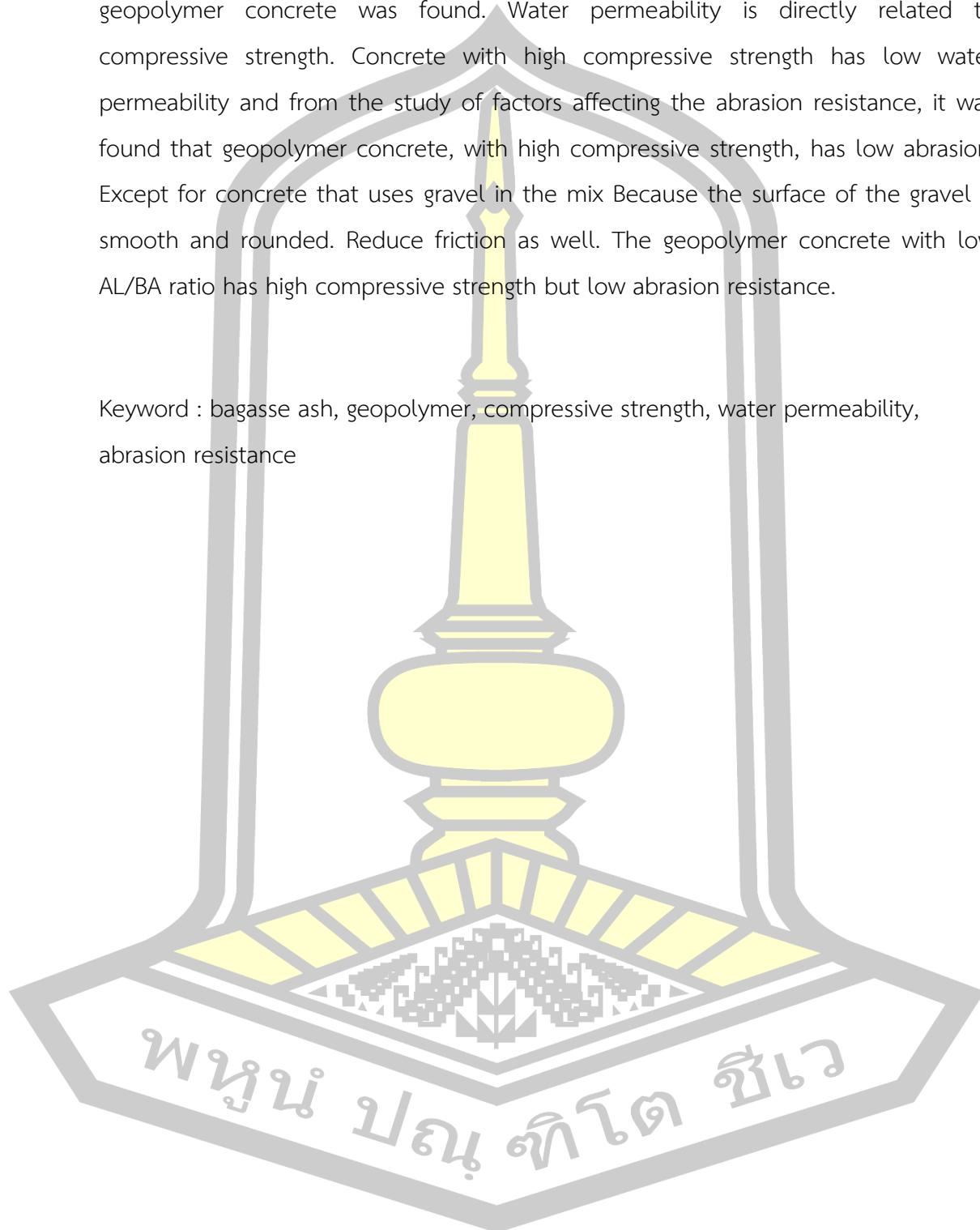
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2021

ABSTRACT

The aim of this research was to utilize bagasse ash, a waste material from the sugar industry, as a precursor to the production of geopolymer concrete. According to the bagasse ash has a lot of silica elements but has little alumina therefore use aluminum dust as waste material to add alumina in the geopolymer. This research used bagasse ash from 2 sources, replaced bagasse ash with aluminum waste 0-1.0% by weight. Vary the ratio of alkaline solution to raw materials (AL/BA) 0.50-0.65 by weight. Curing the sample at 40-100 °C. Use Crushed-limestone and gravel were coarse aggregates in the concrete. The results of the re-burned of bagasse ash were also studied before used as a raw material for geopolymer concrete production. The results showed that the source of bagasse ash had a great effect on compressive strength. Replacing bagasse ash with aluminum waste at 0.40% by weight resulted in the concrete having the highest compressive strength. Low AL/BA resulted in high compressive strength but lower slump of concrete. High temperature curing yields high compressive strength in early age. However, as the concrete age increases. Geopolymer concrete with low temperature curing developed compressive strength to the same as high temperature curing. Coarse aggregate material affected the bond between geopolymer paste and aggregate particles, affecting the strength of concrete. And as a result of refinement of bagasse ash by repeated incineration, the geopolymer concrete has higher compressive strength. Compressive strength of geopolymer concrete produced from re-burned bagasse ash mixed with aluminum waste was 323 and 458 ksc. at age 28 and 90

days, respectively. The study of factors affecting the water permeability rate of geopolymer concrete was found. Water permeability is directly related to compressive strength. Concrete with high compressive strength has low water permeability and from the study of factors affecting the abrasion resistance, it was found that geopolymer concrete, with high compressive strength, has low abrasion. Except for concrete that uses gravel in the mix Because the surface of the gravel is smooth and rounded. Reduce friction as well. The geopolymer concrete with low AL/BA ratio has high compressive strength but low abrasion resistance.

Keyword : bagasse ash, geopolymer, compressive strength, water permeability, abrasion resistance



กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สพหลภ หอมวุฒิมวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางการศึกษาทั้งด้านการศึกษาค้นคว้าข้อมูล การทดสอบ การวิเคราะห์ผล ตลอดจนตรวจสอบเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย กรรมการสอบ ที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาร่วมให้ข้อคิดเห็นและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เรืองฤทธิ์ ชีระโรจน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แนวทางแก้ไข และให้แนวคิดต่างๆ

ขอขอบคุณ นายมีศักดิ์ธนา พัวพิทยากร นายทรงฤทธิ์ พุทธลา และอาจารย์ณัฐพงษ์ ลาดบัวตร บุคลากรของคณะวิศวกรรมศาสตร์และบุคลากรในห้องวิจัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และได้ร่วมทำการศึกษ เก็บรวบรวมข้อมูลทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่มีส่วนร่วมให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมด ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัย ที่ช่วยส่งเสริม สนับสนุน คอยเอาใจใส่ดูแล ให้กำลังใจและสนับสนุนทุนทรัพย์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความกรุณาและปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

พิพรรณ อินปลัด

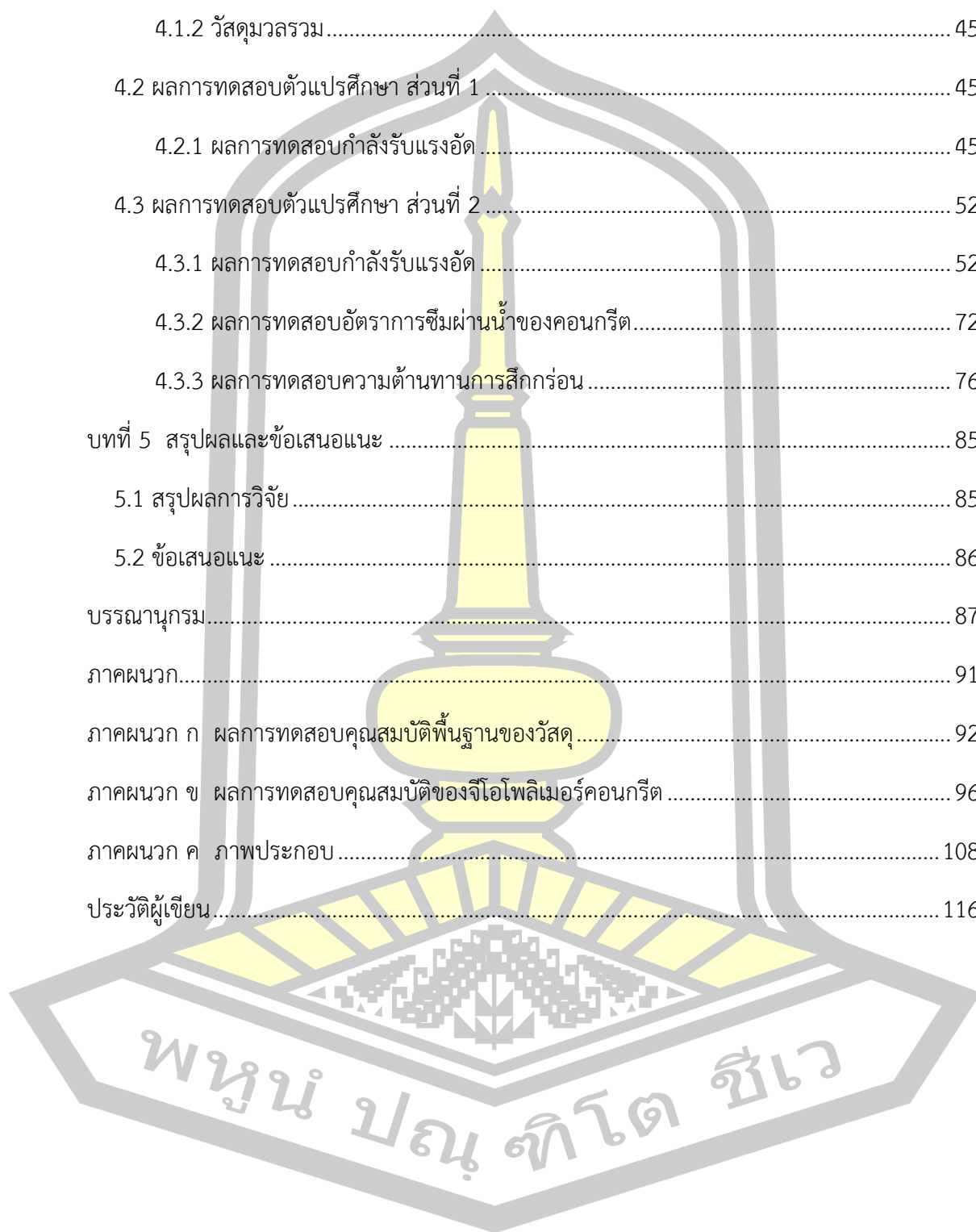
พนุน ปณฺ ทิโต ชิว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหาในการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.3.2 การทดสอบ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer).....	4
2.2 คอนกรีต (Concrete).....	6
2.2.1 ปูนซีเมนต์.....	7
2.2.2 วัสดุมวลรวม (Aggregate).....	8
2.2.3 ความทนทานและความเสียหายของคอนกรีต.....	11
2.3 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete).....	11
2.4 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials).....	12
2.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน.....	13

2.4.2	เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash).....	14
2.5	อลูมิเนียมและเศษอลูมิเนียม (Aluminium and Aluminium Waste).....	17
2.6	สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์และสารประกอบซิลิเกต	18
2.7	การบ่ม (Curing).....	19
2.7.1	การบ่มคอนกรีต.....	19
2.7.2	การบ่มจีโอโพลิเมอร์.....	20
2.8	กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต.....	20
2.9	อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต.....	22
2.10	ความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ.....	23
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1	วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.2	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	32
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
3.4	การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.5	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	34
3.6	การทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	35
3.6.1	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	35
3.6.2	การซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	36
3.6.3	การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	37
3.7	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	37
3.8	คำอธิบายสัญลักษณ์ในงานวิจัย.....	40
บทที่ 4	ผลการทดสอบ.....	44
4.1	ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	44

4.1.1	เก้าชานอ้อย.....	44
4.1.2	วัสดุมวลรวม.....	45
4.2	ผลการทดสอบตัวแปรศึกษา ส่วนที่ 1.....	45
4.2.1	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	45
4.3	ผลการทดสอบตัวแปรศึกษา ส่วนที่ 2.....	52
4.3.1	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	52
4.3.2	ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต.....	72
4.3.3	ผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน.....	76
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	85
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	86
	บรรณานุกรม.....	87
	ภาคผนวก.....	91
	ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	92
	ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	96
	ภาคผนวก ค ภาพประกอบ.....	108
	ประวัติผู้เขียน.....	116



สารบัญตาราง

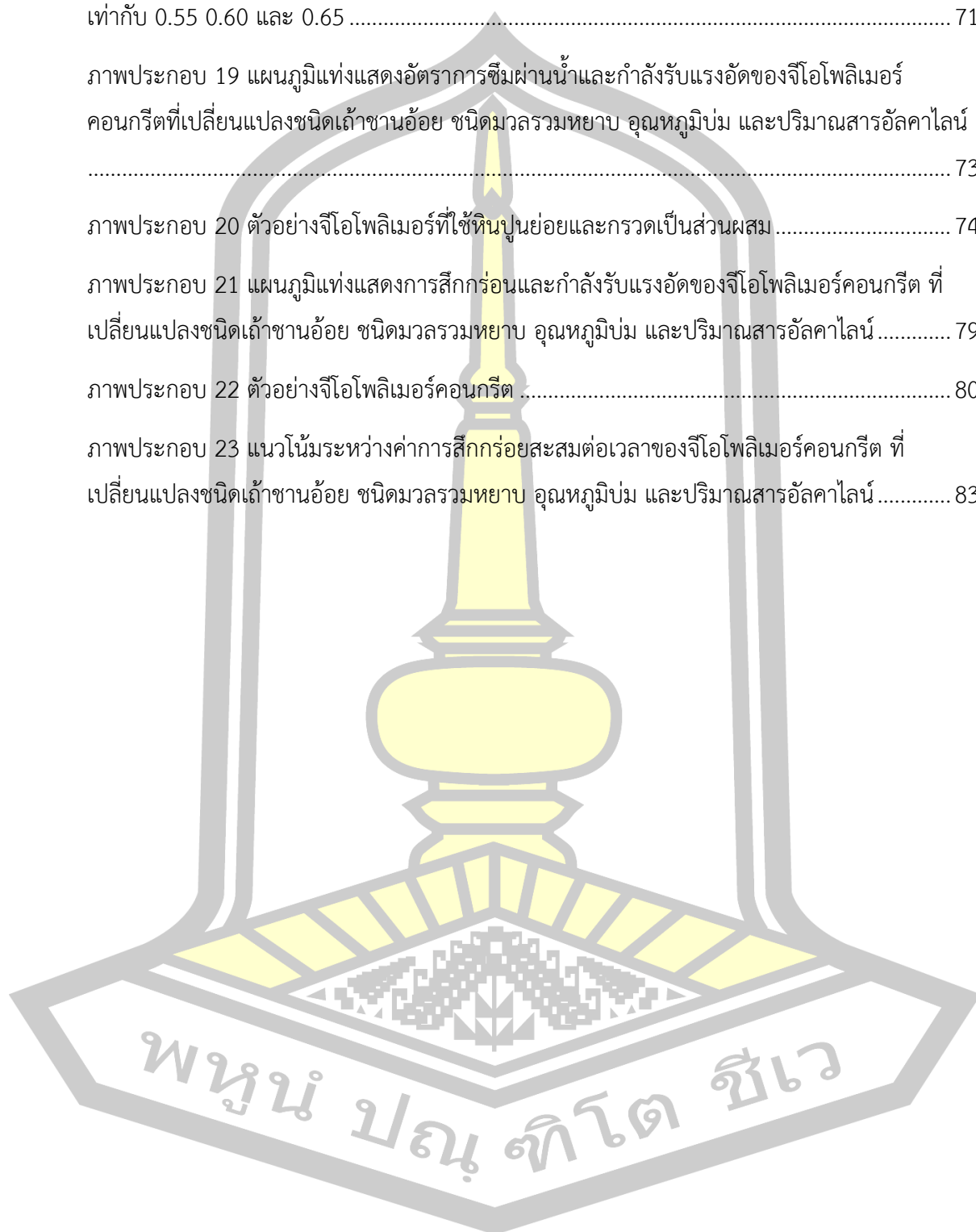
	หน้า
ตาราง 1 องค์ประกอบเคมีของเก้าชานอ้อย.....	16
ตาราง 2 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ของตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1... 41	41
ตาราง 3 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ของตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2... 42	42
ตาราง 4 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเบื้องต้นของเก้าชานอ้อย แห่่ง A และ B และเก้าชานอ้อย แห่่ง A ที่ผ่านการเผาซ้ำ (RBA).....	44
ตาราง 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1	46
ตาราง 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเก้าชานอ้อย 2 แห่่ง และผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยเศษขอมูมเนียม	48
ตาราง 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน สารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น.....	50
ตาราง 8 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม 51	51
ตาราง 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2	53
ตาราง 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเก้าชานอ้อยชนิดดั้งเดิมจาก แห่่งและผ่านเผาซ้ำเป็นวัสดุตั้งต้น	55
ตาราง 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและกรวดในส่วนผสม	59
ตาราง 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มร้อน 40 และ 60 องศาเซลเซียส	63
ตาราง 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.65 0.60 และ 0.50	69
ตาราง 14 ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2 75	75
ตาราง 15 ผลการทดสอบทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำของจีโอโพลิ เมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2.....	78



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 การเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization).....	5
ภาพประกอบ 2 เศษอลูมิเนียมจากการตัดวงกบประตูและหน้าต่าง.....	18
ภาพประกอบ 3 ขั้นตอนการเตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	35
ภาพประกอบ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างทรงลูกบาศก์.....	36
ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างและเครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ.....	36
ภาพประกอบ 6 ตัวอย่างและทดสอบการสึกกร่อน.....	37
ภาพประกอบ 7 ผังขั้นตอนการดำเนินการ.....	39
ภาพประกอบ 8 แก้วชานอ้อยแหล่ง A แก้วชานอ้อยแหล่ง B และเศษอลูมิเนียม.....	44
ภาพประกอบ 9 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง ของแก้วชานอ้อยบด (ก)แหล่ง A และ (ข)แหล่ง B.....	45
ภาพประกอบ 10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของแหล่งที่มาแก้วชานอ้อย.....	47
ภาพประกอบ 11 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	50
ภาพประกอบ 12 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	52
ภาพประกอบ 13 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่ผลิตจากแก้วชานอ้อยชนิดดั้งเดิมและเผาซ้ำ.....	57
ภาพประกอบ 14 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่วัดหลังจากทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	58
ภาพประกอบ 15 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เปลี่ยนแปลงมวลรวมหยابชนิดหินปูนย่อยและกรวด.....	61
ภาพประกอบ 16 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส.....	65
ภาพประกอบ 17 เส้นแนวโน้มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีตเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส.....	67

ภาพประกอบ 18 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลง AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65	71
ภาพประกอบ 19 แผนภูมิแท่งแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงชนิดเถ้าขานอ้อย ชนิดมวลรวมหยาบ อุณหภูมิบ่ม และปริมาณสารอัลคาไลน์	73
ภาพประกอบ 20 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้หินปูนย่อยและกรวดเป็นส่วนผสม	74
ภาพประกอบ 21 แผนภูมิแท่งแสดงการสึกกร่อนและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่เปลี่ยนแปลงชนิดเถ้าขานอ้อย ชนิดมวลรวมหยาบ อุณหภูมิบ่ม และปริมาณสารอัลคาไลน์	79
ภาพประกอบ 22 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	80
ภาพประกอบ 23 แนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่เปลี่ยนแปลงชนิดเถ้าขานอ้อย ชนิดมวลรวมหยาบ อุณหภูมิบ่ม และปริมาณสารอัลคาไลน์	83



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหาในการวิจัย

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อน (Global Warming) และปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่ต้องให้ความสำคัญเนื่องจากปัญหาเหล่านี้เกิดจากมนุษย์เป็นตัวการของสาเหตุเกือบทั้งหมดที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เนื่องจากการตัดไม้ทำลายป่า การปล่อยมลพิษปริมาณมาก รวมถึงการใช้วัตถุดิบทางธรรมชาติมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งเป็นต้นเหตุของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศ ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านอื่นๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม

งานก่อสร้างทั่วโลกใช้คอนกรีตเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งในแต่ละปีมีการผลิตคอนกรีตทั่วโลกนับพันๆ ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งต้องใช้ทรัพยากรปริมาณมาก ไม่ว่าจะเป็นหิน ดินหรือทราย และปูนซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลัก แต่การผลิตปูนซีเมนต์นั้นใช้พลังงานมหาศาลเริ่มตั้งแต่กระบวนการกระเบื้องวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา จนถึง การบดให้ละเอียด มีรายงานระบุว่า การผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาประมาณ 1 ตันเช่นกัน (จักรพันธ์ วังษ์พา, 2552) จึงมีนักวิจัยที่คิดค้นวัสดุมาทดแทนปูนซีเมนต์และการผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ เช่น ปอซโซลานคอนกรีต (Pozzolan Concrete) และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) เป็นต้น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณร้อยละ 9 (Turner K. and Collins G., 2013) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นต้น

การนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้น จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวและยังเป็นวัสดุทางเลือกที่กำลังนิยมในปัจจุบัน หนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคือ เถ้าชานอ้อย โดยเถ้าชานอ้อยนั้นเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำตาลแล้วนำชานอ้อยไปเผาเพื่อนำพลังงานจากการเผาไปใช้งานแล้วจะเหลือเถ้าชานอ้อยที่เกิดจากการเผาไหม้จำนวนมาก เถ้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ ซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐานที่

สามารถนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นของการผลิตวัสดุอัดประสานที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำปฏิกิริยา เช่น โซเดียมซิลิเกต (NaSiO_3) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น จีโอโพลิเมอร์นั้นมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น มีกำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุต้น อัตราการซึมผ่านน้ำต่ำ อัตราการหดตัวต่ำ มีความทนไฟสูง ทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตสูง และทนต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี เป็นต้น (Duxson et al., 2007)

จีโอโพลิเมอร์สามารถเป็นทางเลือกที่น่าพึงพอใจสำหรับใช้เป็นสารยึดประสานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยจีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และ อลูมิเนียม (Al) กับสารละลายอัลคาไลน์ที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้ ซึ่งไม่เพียงแต่เพื่อประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมในแง่ของการหลีกเลี่ยงการปล่อย CO_2 ที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ยังรวมถึงด้านของประสิทธิภาพและความทนทานซึ่งคุณสมบัติบางอย่างดังที่กล่าวมานั้นจีโอโพลิเมอร์ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุตั้งต้น แต่เนื่องจากในเถ้าชานอ้อยนั้นมีซิลิกามากแต่มีอลูมินาน้อย (ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2548; สำเร็จ รักช้อน และนิโรจน์ เงินพรหม, 2553) จึงใช้เศษอลูมิเนียมที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้างประตูและหน้าต่างอลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อเติมอลูมินา โดยมุ่งเน้นการพัฒนา กำลังรับแรงอัดและสมบัติอื่นๆของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลกระทบจากการใช้เศษอลูมิเนียมแทนที่เถ้าชานอ้อยในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต รวมถึงศึกษาผลกระทบจากแหล่งที่มาของเถ้าชานอ้อย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ เถ้าชานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำ และชนิดมวลรวมหยาบ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด อัตราการซึมผ่านของน้ำและความต้านทานการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1.3.1.1 เถ้าชานอ้อยจากโรงผลิตน้ำตาล 2 แหล่ง โดยใช้เถ้าตั้งเดิมจากแหล่งและเถ้าที่มีการเผาซ้ำ จากนั้นนำมาบดให้มีความละเอียดข้างตะแกรงขนาด 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

1.3.1.2 เศษอลูมิเนียมซึ่งเป็นเศษที่ได้จากงานติดตั้งประตูและหน้าต่างอลูมิเนียม โดยนำเศษอลูมิเนียมมาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 ศึกษาอัตราส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0 ถึง 1.0 โดยน้ำหนัก

1.3.1.3 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) เท่ากับ 2.5 ถึง 2.7

1.3.1.4 มวลรวมหยาบ ใช้หิน 2 ชนิด คือ หินปูนย่อยและกรวด มวลรวมหยาบทั้ง 2 ชนิด ขนาด 3/8 นิ้ว

1.3.1.5 สารละลายอัลคาไลน์ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 เตรียมให้มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีองค์ประกอบทางเคมีของ Na_2O ร้อยละ 15.32 SiO_2 ร้อยละ 32.87 H_2O ร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารละลายระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

1.3.2 การทดสอบ

1.3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test) คอนกรีตทรงลูกบาศก์ ตามมาตรฐาน BS 1881 ที่อายุคอนกรีต 3 7 28 และ 90 วัน

1.3.2.2 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีต (Water Permeability of Concrete)

1.3.2.3 การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C1138 (Standard Test Method for Concrete Abrasion Resistance, Underwater Method)

พหุ ประทีป ชีวะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสม (Composites) อลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ (Three-Dimensional Tetrahedral Structure) แบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic Polymers) คำว่า “จีโอโพลิเมอร์” ถูกนำมาใช้โดย Davidovits ในปี 1970 โดยใช้ดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุตั้งต้นกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง จีโอโพลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแหล่งอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างอสัณฐานและสารละลายต่างเข้มข้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้เป็นโครงสร้างสามมิติของอลูมินและซิลิเกต กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถก่อตัว แข็งตัว รับแรงอัดได้ คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ วัสดุตั้งต้นที่ใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์คือวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ซึ่งมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ดินขาว ดินขาวเผาแคลไซต์ และวัสดุของเหลือจากพวกเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าแกลบ เป็นต้น

โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการจับกันระหว่างโมเลกุลของ Si^{+4} และ Al^{+3} เกิดพันธะโคออดิเนตแบบ 4 แขนกับออกซิเจน และทำปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นโครงสร้างโพลิเมอร์ การเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เกิดได้โดยปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน จึงเกี่ยวข้องกับการชะละลาย (Dissolution) การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) การก่อเจล (Gelation) การจัดเรียง (Reorganization) และการรวมตัวเป็นสารเกาะกลุ่ม (Polymerisation) ซึ่งการแข็งตัวของสารประกอบซิลิกาและอลูมินา จะเกิดบริเวณผิวของอนุภาคปรากฏให้เห็นเป็นส่วนอนุภาคแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ในกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์จะเกิดจากวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่อยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์ 5 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การละลาย (Dissolution) การเปลี่ยนวัสดุของแข็งที่ประกอบด้วยอลูมิโนซิลิเกตไปเป็นการสังเคราะห์อัลคาไลออลูมิโนซิลิเกต โดยการละลายของวัสดุของแข็งที่ประกอบไปด้วยอลูมิโนซิลิเกตด้วยสารละลายด่างที่มีไฮดรอกไซด์จะได้สารละลายอลูมินและซิลิเกต

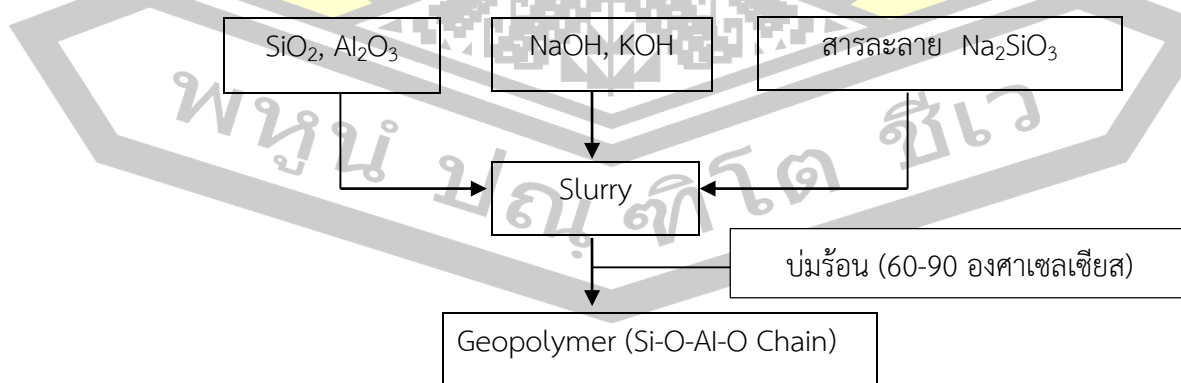
2) สภาวะสมดุลจำเพาะ (Speciation Equilibrium) การละลายของอนุภาคของแข็งที่พื้นผิวเป็นผลให้อลูมินาและซิลิกาเป็นอิสระจะอยู่ในรูปของโมโนเมอร์ เข้าไปในสารละลายส่วนผสมที่ซับซ้อนของซิลิกา อลูมินา และอลูมิโนซิลิกา จะเกิดขึ้นและอยู่ในสภาวะที่มีสภาวะสมดุลจำเพาะ น้ำจะถูกปลดปล่อยระหว่างปฏิกิริยาเคมี น้ำถูกขับออกจากเนื้อจีโอโพลิเมอร์ระหว่างการบ่มและช่วงที่อยู่ในสภาพแห้งต่อไป น้ำที่เหลือจะอยู่ในโพรงขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีผลดีต่อการทำงานหรือการเกิดปฏิกิริยา น้ำในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ ไม่ได้มีส่วนสำคัญในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เพียงแค่เป็นส่วนผสมในการทำปฏิกิริยาในระหว่างการผสม

3) การกลายเป็นเจล (Gelation) การชะล้างของอสัณฐานอลูมิโนซิลิกาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่า pH สูง แล้วเกิดสารละลายอลูมิโนซิลิกาอิมิตัวอย่างมา สารละลายเข้มข้นนี้จะอยู่ในรูปเจล (Gel) ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ในรูปแบบสภาวะที่มีน้ำมีโครงข่ายใหญ่โดยการควบแน่น ขบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่สะสมระหว่างการละลาย น้ำมีส่วนในปฏิกิริยาชั้นกลางแต่ส่วนที่เหลือจะอยู่ในโพรงของเจล โครงสร้างเจลมีสองเฟสประกอบด้วยอลูมิโนซิลิกาและน้ำ

4) การจัดเรียงโครงสร้างใหม่ (Reorganization) หลังจากเกิดเจลระบบยังคงดำเนินต่อไป มีการจัดเรียงตัวและโครงสร้างใหม่

5) การเกิดการก่อตัวแบบลูกโซ่ (Polymerization and Hardening) มีการเชื่อมโยงโครงข่ายมากขึ้นทำให้เกิดโครงข่ายอลูมิโนซิลิกา 3 มิติ

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิกา (Si) อลูมินา (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้นซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย โดยกลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์แสดงดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 การเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization)

โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของสารตั้งต้น โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์แสดงดังสมการ (2.1)



เมื่อ M คือ ธาตุอัลคาไลนัม
- คือ การยึดเกาะ (Bond)
Z คือ จำนวนโมเลกุลของ Si-O₂ เท่ากับ 1 2 หรือ 3
n คือ ปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่
W คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

เทคโนโลยีจีโอโพลิเมอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะในงานก่อสร้างหรืองานคอนกรีตและมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและมอร์ตาร์ในประเทศไทยนั้นยังไม่นิยมแพร่หลาย เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ยังถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่ยังใหม่และยังอยู่ในช่วงพัฒนาเพื่อนำมาใช้ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยเริ่มให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีนี้มากขึ้น โดยคาดว่าจีโอโพลิเมอร์จะเข้ามาทดแทนวัสดุก่อสร้างอย่างซีเมนต์ในอนาคต

2.2 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม เช่น หิน ทราย หรือ กรวด และน้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีผสมเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆ เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้าๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกัน เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปูนซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่า คอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังจากผสม และยิ่งแข็งแรงขึ้นหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากการแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่ คอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างหลายชนิด เช่น อาคาร ถนน เขื่อน เป็นต้น คอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างอาจแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) ใช้แต่คอนกรีตอย่างเดียวไม่มีวัสดุอื่นมาเสริม ใช้สำหรับโครงสร้างที่มีแรงอัดกระทำเพียงอย่างเดียว เช่น ฐานเครื่องจักรที่หนามากๆ หรือเขื่อนกันดินแบบที่ใช้หน้าหนักของตัวเขื่อนต้านแรงดันของดิน (Gravity Wall) ที่สูงไม่เกิน 1.00 เมตร เป็นต้น

2) คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ใช้เหล็กเส้นเสริมกับคอนกรีตใช้สำหรับโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึงกระทำ โดยใช้คอนกรีตทำหน้าที่ต้านแรงอัดและใช้เหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านแรงดึง เหล็กเสริมและคอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวใกล้เคียงกันจึงช่วยกันรับแรงและถ่ายแรงได้ดี โครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีความแข็งแรงมากกว่าคอนกรีตล้วน

3) คอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง (Prestressed Concrete) เป็นคอนกรีตที่ถูกอัดแรงก่อนการใช้งานโดยใช้ลวดเหล็กที่ทนแรงดึงได้สูง คอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงจะแข็งแรงกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนใหญ่จะใช้กับงานสะพานและอาคาร เช่น ในระบบพื้น เป็นต้น

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดได้สูงแต่รับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณร้อยละ 10 ของแรงอัด) โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึงจะมีการเสริมวัสดุอื่นๆ เพิ่มเข้าไปในคอนกรีตเรียกว่า คอนกรีตเสริมแรงหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก (โดยเสริมแรงด้วยเหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีตซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือย

2.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญตัวหนึ่งในคอนกรีต เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะเป็นของเหลวที่มีความหนืดเรียกว่าเพสต์ ซึ่งทำหน้าที่เสมือนกาวประสานมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน เมื่ออายุมากขึ้นเพสต์จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นกึ่งเหลวกึ่งแข็งและในเวลาต่อมาก็จะกลายเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเรื่อยๆตามอายุที่เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงเวลาหนึ่งความสามารถรับกำลังอัดก็จะเริ่มคงที่ การที่ปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำแล้วเกิดการก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์ขึ้นเรียกว่า การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดจากสารประกอบในซีเมนต์ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้รู้สึกว่าร้อนขึ้นเมื่อสัมผัสกับปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.2)



เมื่อ Cement คือ สารประกอบในปูนซีเมนต์

Water คือ น้ำ

C-S-H คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate)

เป็นองค์ประกอบที่ให้กำลังกับคอนกรีต

Ca(OH)_2 คือ ผลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก (pH ประมาณ 12.5) ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดี

Heat คือ ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

ประเภท 1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป

ประเภท 2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ความร้อนเกิดขึ้นมากกว่าประเภทที่หนึ่ง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง

ประเภท 3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการให้รับกำลังอัดเร็วหรือต้องการถอดไม้แบบเร็ว

ประเภท 4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่มีปริมาณมากหรือคอนกรีตหนา (Mass Concrete) มีความร้อนเกิดขึ้นมากจึง ต้องใช้ปูนซีเมนต์ความร้อนต่ำ

ประเภท 5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulphate Resistance Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตของโครงสร้างที่อยู่ในน้ำทะเล หรือดินที่มีซัลเฟต

2.2.2 วัสดุมวลรวม (Aggregate)

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้างส่วนใหญ่ได้แก่ หินย่อย กรวด และทราย ซึ่งเป็นแร่ธาตุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ วัสดุมวลรวมอาจได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินอัคนี หินชั้น และหินแปร หรือวัสดุที่ทำเทียมขึ้น เช่น วัสดุผสมตะกรันเตาถลุงซึ่งเป็นกากหรือตะกรันที่รับจากการหล่อ โลหะแล้วนำมาบดให้ได้ขนาดตามต้องการ วัสดุมวลรวมอาจเรียกว่าเป็นตัวแทรก (Filler Material) ในเนื้อคอนกรีต เพราะเนื้อคอนกรีตมีหินและทรายผสมอยู่เป็นส่วนใหญ่ประมาณสามในสี่ส่วน และโดยที่ราคาของวัสดุผสมถูกกว่าซีเมนต์ ดังนั้นมวลรวมจึงมีส่วนทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง

2.2.2.1 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

มวลรวมละเอียดหรือวัสดุผสมละเอียด หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร วัสดุผสมที่เล็กกว่านี้เรียกว่า ฝุ่น (Silt or Clay) โดยมวลรวมละเอียดที่นิยมใช้ส่วนใหญ่คือทราย ทรายเป็นตัวที่แทรกเข้าไปในส่วนโครงสร้างคอนกรีตซึ่งหินเข้าไปไม่ได้ โดยทรายจะถูกเคลือบและยึดประสานด้วยซีเมนต์ ถ้าคอนกรีตไม่มีส่วนผสมของทรายจะทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงเป็นเหตุให้ความแข็งแรงและการยึดเหนี่ยวต่ำลง ทรายแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้ 4 ประเภท ดังนี้

1) ทรายบกหรือทรายบ่อ (Bank or Pit Sand) เกิดจากการแยกตัวของหินทรายที่ฝังอยู่ในดินเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ มักนิยมนำมาใช้เนื่องจากทรายชนิดนี้ มีเหลี่ยมมุมและมุมแข็งแรงดี แต่ทรายชนิดนี้มักมีดิน พีช และซากสัตว์ปนอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการและควรมีอยู่ในทรายน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ดังนั้นเมื่อจะนำมาใช้ต้องนำทรายมาล้างหรือแยกให้สะอาด

2) ทรายแม่น้ำ (River Sand) ทรายชนิดนี้อยู่ในแถบที่ราบลุ่มแม่น้ำ ตามท้องน้ำลำคลองเก่า สันดอนทรายชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติโดยถูกน้ำพัดพามาจากที่อื่นมารวมกัน ซึ่งเป็นทรายสะอาดด้วยน้ำเป็นตัวพัดพาทำความสะอาดเอาผงโคลน เศษวัสดุอื่นๆออกขณะเคลื่อนตัว ดังนั้นทรายแม่น้ำจึงสะอาดพอที่จะนำมาใช้งาน ในส่วนข้อเสียที่เกิดจากการกระทบกันตอนพัดพาทำให้ เม็ดทรายเสียดสีกันจนมีลักษณะค่อนข้างกลม ส่วนมากปราศจากเหลี่ยมมุมสำหรับยึดเกาะทำให้การประสานกันกับส่วนของคอนกรีตไม่ดีนักเมื่อเทียบกับทรายบก ดังนั้นการพิจารณาในการนำมาใช้งาน ต้องคำนึงถึงผลที่เกิดกับงานในด้านต่างๆด้วย

3) ทรายทะเล พบได้ตามชายทะเลหรือบนบกห่างจากทะเลแต่ยังมีความเค็มและยังมีเกลือติดอยู่ ทรายทะเลไม่นิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีต

4) ทรายที่ได้จากการร่อน เป็นหินที่มนุษย์ทุบหรือย่อยเป็นก้อนเล็กๆขนาดเหมือนทรายซึ่งเรียกว่า “ทรายประดิษฐ์” (Manufactured Sand) ทรายประดิษฐ์ทำขึ้นใช้ในบางประเทศแล้วเนื่องจากขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ

ทรายที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างหรืองานคอนกรีต ได้แก่ ทรายเม็ดละเอียดเม็ดเล็กขนาด 0.5-1.5 มิลลิเมตร ใช้ในงานปูนก่อฉาบปูน ทรายเม็ดกลาง ขนาด 1-2 และ 3 มิลลิเมตร ใช้ในงานเทคอนกรีต ปูนก่อที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนังได้ดิน พื้น คาน และงานคอนกรีตทั่วไป ทรายหยาบเม็ดใหญ่ ขนาด 2-4 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีตเทพื้น ฐานราก และในงานที่ต้องรับแรงอัดสูง

2.2.2.2 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

เป็นวัสดุที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ กรวด หินย่อยหรือหินไม่ หินย่อยที่ใช้ในการก่อสร้างส่วนมากมาจากภูเขา ได้จากการระเบิดออกมาแล้วจึงค่อยนำมาย่อยด้วยเครื่องย่อยหิน คุณสมบัติของมวลรวมที่จะนำมาผสมคอนกรีตควรมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1) ความแข็งแรง (Strength) วัสดุมวลรวมต้องมีความสามารถรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการของคอนกรีต หินที่ใช้ทำคอนกรีตโดยทั่วไป ถ้าไม่ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงโดยสภาพอากาศ จะพอดีสำหรับผสมคอนกรีตมาก ความแข็งแรงของหินมีค่าประมาณ 700 ถึง 3,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2) ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของหินที่จะนำมาผสมคอนกรีตในงานที่ต้องทนต่อแรงกระแทกและเสียดสีมากๆ เช่น การทำพื้นหรือถนน

คอนกรีตที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกมากมาย การทดสอบเพื่อหาคุณภาพข้อนี้ โดยทั่วไปนิยมใช้วิธี Los Angeles Abrasion Test ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักของหินที่สูญเสียไปในการทดสอบกับข้อกำหนด

3) ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Resistance to Temperature Changes) เป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับ ความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ วัสดุมวลรวมต้องมีรูพรุนพอที่จะดูดซึมน้ำ มีช่องว่างพอที่จะให้ น้ำขยายตัวได้ในอากาศหนาว มิฉะนั้นจะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

4) ความคงตัวต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability) วัสดุผสมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ วัสดุผสมในบางท้องถิ่นที่มีสารเคมีผสมอยู่ในเนื้อดิน จะทำปฏิกิริยากับต่างในปูนซีเมนต์เกิดเป็นเจลและขยายตัวทำให้เกิดรอยร้าวภายในคอนกรีต ในกรณีที่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุมวลรวมเหล่านี้ จะต้องใช้กับปูนซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบของต่างต่ำ

5) ลักษณะรูปร่างและผิว (Particle Shape and Surface Texture) มีความสำคัญต่อการควบคุมความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ผสมใหม่ วัสดุที่ใช้ควรมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม วัสดุแบบเรียวยาวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ เพราะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมที่มีรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมเพื่อให้ได้ความสามารถทำงานได้ (Workability) ที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สิ้นเปลืองปูนซีเมนต์ ลดกำลังและแรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อคอนกรีต การใช้วัสดุรูปร่างกลมจะช่วยทำงานง่ายและประหยัด เพราะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสมน้อยกว่าวัสดุที่เป็นเหลี่ยมมุม แต่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างก้อนมวลรวมหยาบกับซีเมนต์ต่ำกว่า วัสดุที่มีผิวหยาบหรือตันจะช่วยให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างก้อนดีขึ้น

6) ความสะอาด (Cleanliness) วัสดุต้องสะอาด มีสารที่จะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของคอนกรีตน้อยที่สุด สารเหล่านี้ ได้แก่ เปลือกหอย ถ่านหิน ถ่าน เศษไม้ ก้อนดิน โคลนเลน ฝุ่นพลาสติก หรือฝุ่นละเอียด สิ่งเหล่านี้จะลดความทนทานและแรงยึดเหนี่ยว บางครั้งอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวมีกำลังต่ำ แข็งตัวช้าหรือไม่แข็งเลย เกิดรอยเปื้อนหรือหลุดออกเป็นรูโพรง การขจัดสิ่งสกปรกที่เจือปน ทำได้หลายวิธี เช่น ล้างน้ำแล้วร่อนผ่านตะแกรง เป็นต้น

7) ขนาดคละ (Gradation) วัสดุผสมที่ใช้ผสมทำคอนกรีต ต้องมีความลดหลั่นของขนาด ซึ่งจะช่วยให้เรียงตัวได้แน่นและมีช่องว่างน้อย การทดสอบหาคุณสมบัติข้อนี้ทำได้โดยวิธีผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Gradation Test)

8) แรงยึดเหนี่ยว (Bond) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของมวลรวมกับกำลังของซีเมนต์เพสต์ ลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อการจับยึดกับซีเมนต์เพสต์ มวลรวมที่มีเหลี่ยมมุมและพื้นที่ผิวมากจะส่งผลให้มีการยึดเหนี่ยวที่ดี ลักษณะผิวของมวลรวมมีผลโดยตรงกับ

แรงยึดเหนี่ยวสูงตั้งแต่ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มากขึ้น สำหรับลักษณะทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับแร่ประกอบต่างๆ ของมวลรวมซึ่งแร่บางชนิดอาจทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์เพสต์ทำให้กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์รอบๆ ลดลง

2.2.3 ความทนทานและความเสียหายของคอนกรีต

คอนกรีตที่ดีต้องมีกำลังตามต้องการและทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถคงรูปร่าง คุณภาพ สมบัติ และการใช้งานได้ดีเช่นเดิม ความทนทานของคอนกรีตก็คือความสามารถของคอนกรีตในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงนั้นได้

คอนกรีตในโครงสร้างต่างๆ อาจเกิดความเสียหายหรือขาดความทนทาน อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมหรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องไม่เหมาะสม ความเสียหายอาจเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือบางครั้งอาจเกิดขึ้นหลังจากใช้งานโครงสร้างคอนกรีตนั้นไปแล้วช่วงเวลาหนึ่งและความเสียหายนี้อาจเกิดมาจากสาเหตุภายในหรือภายนอกเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 สาเหตุ คือ สาเหตุด้านกายภาพ (Physical) เช่น ความเสียหายเนื่องจากความร้อน น้ำหนักบรรทุกมากเกินไป สาเหตุด้านเคมี (Chemical) เช่น การซึมผ่านของสารเคมีเข้ามากัดกร่อนคอนกรีตและเหล็ก และสาเหตุทางกล (Mechanical) เช่น การสีกกร่อน การเสียดสี จนเกิดความเสียหาย

ขอบเขตของความเสียหายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเฉพาะที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คุณภาพของคอนกรีต ความหนาแน่นของคอนกรีต และความรุนแรงของสภาพแวดล้อมเป็นต้น ที่ทำให้เกิดความเสียหายของคอนกรีต ปัจจัยหรือสาเหตุต่างๆ เช่น กระบวนการคาร์บอนเนชัน การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต การกัดกร่อนเนื่องจากกรด การสีกกร่อนของคอนกรีต เป็นต้น

2.3 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete)

เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก โดยใช้สารละลายด่างและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อแข็งตัวแล้วจีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงมาก โดยโครงสร้างยึดกันเป็นร่างแห จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ด้านโครงสร้างเช่น จีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต วัสดุก่อสร้าง วัสดุทำผิวทาง วัสดุทนไฟ วัสดุป้องกันการรั่วไหลของสารเคมี วัสดุตกแต่งเพื่อความ เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยเริ่มทำการวิจัยทางด้านจีโอโพลิเมอร์เมื่อปลายปี 2547 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2548) เริ่มทดลองผลิตจีโอโพลิเมอร์โดยใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะเป็นวัสดุตั้งต้น

จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) คือการนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีต โดยวัสดุที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เถ้า

ลอย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความละเอียดสูง ไม่ต้องปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุก็สามารถนำมาใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงได้ (Assi et al., 2016; Xie and Kayali, 2014) แต่ก็มีวัสดุอื่นๆที่นิยมนำมาศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เช่น ดินขาวเผา แก้วชานอ้อย เป็นต้น (Noor-UL-Amin et al., 2016; Tippayasam et al., 2014) สำหรับสารอัลคาไลน์ที่เป็นตัวทำปฏิกิริยานิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) (Assi et al., 2016; Noor-UL-Amin et al., 2016; Tippayasam et al., 2014) ส่วนชนิดและขนาดของมวลรวมในส่วนผสมนั้นได้แก่ หิน มักจะใช้หินปูนหรือหินที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นและใช้ขนาดหินขนาดเล็กตั้งแต่หินบดหรือหินเกร็ดจนถึงขนาดประมาณ 12.5 มิลลิเมตร (ปกป้อง รัตนชู และคณะ, 2559) ส่วนทรายมักใช้ทรายหยาบที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น ส่วนผสมอื่นนั้นอาจมีสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สำหรับวิธีการ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการบ่มส่งผลต่อความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยสภาพการบ่ม (ในแม่พิมพ์หรือนอกแม่พิมพ์) มีผลต่อความแข็งแรงไม่มากนัก แต่อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มมีผลต่อความแข็งแรงอย่างมากพอสมควร (Assi et al., 2016; Haddad and Alshbuol, 2016) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอยู่มากคือ ปริมาณน้ำน้อยจะทำให้ความแข็งแรงมากแต่ไม่ควรน้อยเกินไปเพราะอาจส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและความสามารถในการทำงานได้ (Xie and Kayali, 2014)

2.4 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials)

มาตรฐาน ASTM C168 ให้จำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลาน เป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” และได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

- 1) ชั้นคุณภาพ N เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการปรับปรุงสมบัติหรือการเผามาก่อนแล้วจึงจะสามารถนำมาใช้งานได้
- 2) ชั้นคุณภาพ F เป็นถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) ถ่านหินในชั้นคุณภาพนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน
- 3) ชั้นคุณภาพ C เป็นถ่านล่อยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) ถ่านหินชั้นคุณภาพนี้ นอกจากจะมีสมบัติเป็นปอซโซลานแล้ว ยังสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์อีกด้วย กล่าวคือสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้ทันที และถ่านล่อยในชั้นมาตรฐานนี้อาจมีปูนขาวปนอยู่มากกว่าร้อยละ 10

วัสดุปอซโซลานที่มีการศึกษาและใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง สามารถแบ่งโดยแหล่งที่มาได้ 2 ประเภท คือ ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ได้แก่ ดินขาว (Metakaolin) เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) หินภูเขาไฟ (Volcanic Rock) เปลือกหอย (Shell) เป็นต้น วัสดุปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติเหล่านี้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้แต่ต้องนำไปปรับปรุงสมบัติโดยผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การเผา การบด เพื่อปรับเปลี่ยนสถานะของวัสดุและเพิ่มความละเอียดทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ และปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan) ได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) เถ้าชีวมวล (Bio-Mass Ash) เป็นต้น สำหรับเถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยนั้นมีการศึกษาวิจัยและนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลานสำหรับงานโครงสร้างอย่างแพร่หลาย วัสดุปอซโซลานชนิดเถ้าต่างๆจะประกอบด้วยอนุภาคขนาดค่อนข้างเล็ก มีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 60 และมีองค์ประกอบของอลูมินาแตกต่างกันไป

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและมอลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเพียงเล็กน้อยหรืออาจจะมีเลย แต่จะสามารถจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติได้เมื่อมีความชื้นและวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดสูงหรือมีอนุภาคขนาดเล็ก เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน

2.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 เกิดจากการทำปฏิกิริยาของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนในรูป สมการดังแสดงในสมการ (2.3) และ (2.4)



ผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆของของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติต้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และ ความทนทาน เป็นต้น

2.4.2 เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash)

เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งนำส่วนต่างๆ ของต้นอ้อย เช่น ชานอ้อยและใบอ้อยมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเพื่อต้มน้ำในหม้อต้มและผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงานและส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าที่ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยในปี พ.ศ.2559-2560 มีปริมาณอ้อยที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลประมาณ 105 ล้านตันต่อปี (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย, 2559) หลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลมีกากอ้อยและหลังจากนั้นกากอ้อยเหล่านี้ถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนและแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการเผาว่าจะเหลือเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย (Fairbairn et al., 2010) หรือประมาณ 651,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเถ้าชานอ้อยเหล่านี้ส่วนหนึ่งนำไปใช้เป็นปุ๋ยในด้านการเกษตร (แต่มีสารอาหารสำหรับพืชน้อย) แต่ส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบหรือถมในดิน นอกจากจะไม่เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจแล้ว ยังเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุนจัดหาที่ดินสำหรับการฝังกลบ และเกิดผลกระทบทางด้านการฟุ้งกระจายในอากาศเนื่องจากเถ้ามีลักษณะเป็นฝุ่นผงที่ค่อนข้างเล็ก และการถูกน้ำฝนชะล้างแล้วไหลลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้สภาพแวดล้อมโดยรอบบริเวณมีปัญหาเกิดขึ้น

เถ้าชานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอน เมื่อบดเถ้าชานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับเถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมันหลังผ่านการบดทั่วไป คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยก่อนบด สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยพบว่าเถ้าชานอ้อยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับเถ้าแกลบบดละเอียดและเถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ SO_3 ต่ำ แต่ปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูง

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อย จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มเพิ่มตามอัตราส่วนของเถ้าชานอ้อยที่ใช้ในส่วนผสม ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ มีการศึกษาใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการทำงาน (Workability) และการเยิ้มน้ำที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งแรง ไม่หลุดร่อนได้ง่าย สำหรับสมบัติด้านอื่นๆ เช่น ความสามารถด้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านของน้ำ การต้านทานคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอนขึ้น พบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยจะมีสมบัติดังกล่าวใกล้เคียงกันกับคอนกรีตธรรมดา ส่วนสมบัติในการต้านทานการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกัน (Freezing and Thawing) คอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยแสดงแนวโน้มที่ต้านทานได้ดีดีกว่าคอนกรีตธรรมดา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความพรุนของอนุภาคเถ้าชานอ้อย เมื่อพิจารณาภาพรวมแล้ว

การใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตนั้น สมบัติด้านต่างๆอาจจะไม่ได้เหนือกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ได้ ลดต้นทุนของคอนกรีตจากการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าชานอ้อย แสดงว่าเถ้าชานอ้อยมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ และมีปริมาณมากพอที่พัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาเพื่อหาองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้เถ้าชานอ้อยยังคงมีการดำเนินการอยู่ในสมบัติบางอย่าง เช่น ด้านความคงทนของคอนกรีตในระยะยาว สมบัติของเถ้าชานอ้อยในแต่ละแหล่งผลิตที่แตกต่างกันอาจทำให้สมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไป ยังต้องนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต

เนื่องเถ้าชานอ้อยมีลักษณะคล้ายท่อหรือหลอดขนาดใหญ่ เหลี่ยมมุม ไม่แน่นอนและมีความพรุนสูง หากทำการบดเพื่อให้ขนาดอนุภาคเล็กลงจะได้อนุภาคที่มีลักษณะเหลี่ยมมุมและความพรุนลดลง โดยความละเอียดของเถ้าชานอ้อยมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เถ้าชานอ้อยจะมีปริมาณซิลิกาสูงขึ้นเมื่อค่าร้อยละการสูญเสียระหว่างการเผาไหม้ลดลงดังแสดงในตาราง 2 นอกจากนี้ผลของร้อยละการสูญเสียจากการเผาไหม้ต่อสมบัติของคอนกรีต พบว่าเถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียจากการเผาไหม้น้อยกว่าร้อยละ 10 มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่ดี สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตได้ ในขณะที่การนำเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 20 มีผลทำให้ความสามารถในการทนทานการกัดกร่อนจากซัลเฟตลดลง (Chusilp et al., 2009) เถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดสูง มีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถใช้ร่วมหรือทดแทนในงานคอนกรีตได้ ทำให้รับน้ำหนักได้ดีขึ้น ทนต่อสารละลายซัลเฟต อัตราการซึมผ่านน้ำลดลง (อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์, 2551)

2.4.2.1 จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย

เถ้าชานอ้อยสามารถนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่อแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปในเถ้าชานอ้อยนั้นมีองค์ประกอบของซิลิกาในปริมาณค่อนข้างสูงและมีปริมาณของอลูมินาน้อย ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ และได้มีการผสมวัสดุอื่นที่มีองค์ประกอบของอลูมินาเข้าไปบางส่วน เพื่อที่จะปรับปรุงให้คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ให้ดีขึ้น และยังมีกระบวนการเผาเถ้าชานอ้อยที่มีแนวคิดเช่นเดียวกับการเผาดินขาวที่สามารถช่วยให้ผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นได้

การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าชานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูง โดยอาจสูงถึงร้อยละ 10-25 การที่ LOI ของเถ้าชานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป อย่างไรก็ตาม LOI ที่ค่อนข้างสูงของเถ้าชานอ้อยไม่ได้เป็นคาร์บอน หรือกากชานอ้อยที่เผาไหม้ไม่หมด แต่เป็นสารประกอบอื่นที่สลายภายใต้การเผาที่อุณหภูมิ LOI ที่มีค่าสูงอาจไม่ได้ส่งผลกระทบต่อ

รุนแรงต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยในปริมาณต่ำมากนัก แต่ผลกระทบของ LOI ต่อการแทนที่ในปริมาณสูงนั้นยังมีการศึกษาอยู่น้อย

ตาราง 1 องค์ประกอบเคมีของเถ้าชานอ้อย

ที่มา : (Chusilp et al., 2009)

องค์ประกอบเคมี	เถ้าชานอ้อย (ร้อยละ)	เถ้าชานอ้อยบด (ร้อยละ)			
		L05	L10	L15	L20
SiO ₂	54.10	77.37	70.64	60.67	54.45
Al ₂ O ₃	5.69	3.59	3.68	4.30	6.06
Fe ₂ O ₃	3.54	4.66	4.06	4.02	3.23
CaO	15.37	7.81	10.68	15.85	15.41
MgO	1.41	1.32	1.41	1.46	1.37
SO ₃	0.03	0.15	0.15	0.09	0.04
LOI	19.36	5.08	9.29	13.59	19.39
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	63.33	85.62	78.38	68.99	63.74

หมายเหตุ : ค่า L05 L10 L15 และ L20 หมายถึง เถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ประมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 ตามลำดับ

โดยทั่วไปในเถ้าชานอ้อยนั้น มีองค์ประกอบของ SiO₂ ในปริมาณค่อนข้างสูง และมีปริมาณของ Al₂O₃ น้อย ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ และได้มีการผสมตะกอนน้ำประปาเข้าไปบางส่วน เนื่องจากพบว่าในตะกอนน้ำประปามีปริมาณของ Al₂O₃ ที่ค่อนข้างสูง แต่กลับพบว่าแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดลดลงในช่วงอายุต้น ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของดินที่มีอนุภาคบางส่วนไม่ทำปฏิกิริยา และจากลักษณะทางกายภาพของตะกอนน้ำประปาที่มีความคล้ายกับดินขาว ซึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินขาว คือการเผาด้วยอุณหภูมิสูง เพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นไปได้ว่าการเผาตะกอนน้ำประปาจะสามารถทำให้คุณสมบัติดีขึ้นเช่นเดียวกับการเผาดินขาว และสามารถช่วยให้ผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นได้ จากการศึกษาของงานวิจัยนี้พบว่า ในการใช้ตะกอนน้ำประปาเผาที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที เป็นการปรับปรุงคุณภาพของตะกอนน้ำประปาให้มีความเป็นอสัณฐาน และมีธาตุประกอบของ Al₂O₃ ที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ด้านอัตราส่วนการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาที่ร้อยละ 10 และใช้อัตราส่วน

สารละลาย โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.00 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อเทียบกับทุกอัตราส่วนการแทนที่ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 15 โมลาร์ และให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดในทุกช่วงอายุ โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าระหว่าง 371 ถึง 385 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วรายศ วิจิตริศานต์ และคณะ, 2557)

2.5 อลูมิเนียมและเศษอลูมิเนียม (Aluminium and Aluminium Waste)

อลูมิเนียม (Aluminium) เป็นธาตุโลหะที่พบได้แพร่หลายในชีวิตประจำวัน เนื่องจากอลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ จึงมีการนำอลูมิเนียมมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย เช่น การนำมาใช้แทนไม้ซึ่งนิยมมากในภาคครัวเรือน เนื่องจากคุณสมบัติที่คงทนต่อการหักงอ ทนต่อความร้อน ทนต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบา มีความสามารถในการสะท้อนแสงและความร้อนได้ดีพอควร จึงมักถูกนำไปใช้ในการทำโครงสร้างต่างๆ ของบ้าน เช่น หน้าต่าง ประตู งานตกแต่งภายนอกและภายใน เป็นต้น และถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมการผลิตหลายแขนง เช่น อุตสาหกรรมกระป๋องบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ชิ้นส่วนเครื่องบิน เครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนเครื่องดนตรี ชิ้นส่วนเครื่องประดับ ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งยังเป็นส่วนผสมในเม็ดงานขัดพื้นผิว

การผลิตอลูมิเนียมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการแยกให้ได้ออกไซด์อลูมิเนียมอย่างเดียว (Pure Al_2O_3) จากแร่บอกไซต์ ขั้นตอนที่สองผลิตอลูมิเนียมโดยการแยกอลูมิเนียมที่หลอมละลายด้วยไฟฟ้า การแยกอลูมิเนียมจากแร่ใช้กรรมวิธีของไบเยอร์ (Bayer Process) คือ ล้างแร่บอกไซต์ให้สะอาด ตากแห้ง บดละเอียด ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ ($NaOH$) ในตู้อบ ได้สารละลายโซเดียมอลูมิเนต (Sodium Aluminate, $NaAlO_2$) สารที่เจือปนในแร่บอกไซต์ เช่น เหล็ก ซิลิกา จะไม่ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟและตกเป็นตะกอนสีแดง (Red Mud) กรองสารละลายออกแล้วทิ้งสารละลายไว้จนเกิดตะกอนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide, $Al(OH)_3$) กรองเอาตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ออก แล้วนำไปเผาที่หินปูนในเตาเผาแบบหมุนชนิดเดียวกับที่ใช้เผาซีเมนต์ (Rotary Kiln) จะได้ออกไซด์อลูมิเนียมที่บริสุทธิ์

สมบัติทางเคมีของอลูมิเนียมในลักษณะต่างๆ ได้แก่ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ เรียกว่า อลูมิเนียมออกไซด์ เคลือบบนชั้นผิวอลูมิเนียมป้องกันการเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ได้ดี การทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนจะทำให้เกิดไนไตรด์ที่อุณหภูมิสูง อลูมิเนียมไม่ทำปฏิกิริยากับกำมะถัน อลูมิเนียมสามารถทนต่อการดองอินทรีย์เข้มข้นได้ปานกลาง ทนต่อปฏิกิริยาของด่างได้เล็กน้อย สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นด่างเข้มข้น อลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยากับเกลือได้ ทำให้เกิดการกัดกร่อน

ปัจจุบันมีการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนจำนวนมาก มีการใช้วัสดุในงานก่อสร้างหลากหลาย อลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มักนำมาทำเป็นกรอบบานประตูและหน้าต่าง ราวบันได และงานตกแต่งอื่นๆ ใน ขบวนการตัดและประกอบวงกบประตูและหน้าต่างอลูมิเนียมจะเหลือเศษอลูมิเนียมที่มีขนาด ประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร แสดงดังภาพประกอบ 2 ซึ่งเป็นเพียงเศษเหลือทิ้งไม่ได้มีการนำ เศษวัสดุนี้ไปใช้ประโยชน์



ภาพประกอบ 2 เศษอลูมิเนียมจากการตัดวงกบประตูและหน้าต่าง

2.6 สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์และสารประกอบซิลิเกต

กระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์เริ่มจากการนำสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง เช่น อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) และมีการเติมสารประกอบซิลิเกตเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาที่พร้อมทำปฏิกิริยาให้กับระบบ สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพราะเป็นสารที่มีค่าความเป็นด่างสูง สามารถเกิดปฏิกิริยากับวัสดุพอลิซิลานได้ดี โดย อัตราส่วนสารละลายต่างจะต้องมีปริมาณความเข้มข้นที่มากพอสำหรับการทำปฏิกิริยา เพื่อจะพัฒนา ความสามารถในการพัฒนากำลังอัด สารที่จำเป็นอีกหนึ่งชนิดคือสารประกอบซิลิเกต เช่น สารละลาย โซเดียมซิลิเกต (Na_2O_3) นิยมใช้เพราะสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีและยังเป็นการเพิ่มซิลิกาให้กับ ปฏิกิริยาด้วย

สำหรับอัตราส่วนของการใช้อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์และสารประกอบซิลิเกตนั้น หากโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) สูง จะทำให้กำลังรับแรงอัดได้ดีแต่ ความสามารถในการทำงานได้จะต่ำ สารประกอบซิลิเกตทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นใน อัตราส่วนที่สูงขึ้นเป็นตัวทำให้สารซิลิกาและอลูมินารวมตัวกันในลักษณะของโครงสร้าง

แบบสามเหลี่ยม การชะละลายของวัสดุยึดประสานขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาชะละลาย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นปานกลางคือ 10 โมลาร์ และระยะเวลาในการชะละลาย 10 นาที ให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สูง สามารถทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กำลังอัดสูงถึง 65 เมกะปาสคาล เทียบเท่ากับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549)

2.7 การบ่ม (Curing)

2.7.1 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตคือวิธีที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากคอนกรีตแข็งตัว หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมี 2 ประการ คือ การป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต และการรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม สำหรับวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน และเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด กรรมวิธีบ่มการบ่มแบ่งตามสภาพอุณหภูมิการบ่มได้ 2 ประเภท คือ

1) การบ่มที่อุณหภูมิปกติ สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือการเพิ่มความชื้น และการป้องกันการเสียน้ำในเนื้อคอนกรีต

1.1) การเพิ่มความชื้น โดยให้ความชื้นต่อผิวของคอนกรีตโดยตรงในระยะแรกที่คอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้นอกจากจะเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้วยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตลงด้วย จึงเหมาะกับคอนกรีตที่เทในสภาพอากาศร้อน

1.2) วิธีการป้องกันการเสียน้ำในเนื้อคอนกรีต วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตไม่ให้ระเหยออกสู่ภายนอก สามารถทำได้โดยการใช้กระดาษกันน้ำ ผ้า พลาสติก หรือสารเคมีปิดผิวคอนกรีตเป็นต้น อย่างไรก็ตามไม้แบบที่ยังไม่ถอดก็สามารถป้องกันการเสียน้ำได้เช่นกัน

2) การบ่มที่อุณหภูมิสูง เป็นการบ่มที่สามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังได้อย่างรวดเร็ว เป็นที่นิยมในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คาน และแผ่นพื้น เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถผลิตได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดแบบหล่อเพราะสามารถถอดแบบได้เร็ว คอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทนต่อการเคลื่อนย้าย

นอกจากนี้ยังมีการบ่มด้วยไอน้ำที่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) การบ่มด้วยไอน้ำความดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing) อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 40-100 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ให้ผลดีที่สุดจะอยู่ระหว่าง 65-80 องศาเซลเซียส การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นกับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการ นอกจากอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้บ่มแล้ว อีกปัจจัยที่สำคัญคือเวลาที่ใช้ในการบ่มซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลาการที่เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุด และการลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิกปกติ

2) การบ่มด้วยไอน้ำความดันสูง (High Pressure Steam Curing) หากต้องการบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส ต้องให้ความดันสูงขึ้นและต้องบ่มคอนกรีตในภาชนะที่ปิดสนิทที่เรียกว่า หม้ออบความดัน (Autoclave) อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 160-210 องศาเซลเซียส มีความดัน 6-20 ความดันบรรยากาศ สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะดังกล่าวมีคุณสมบัติต่างจากสารซึ่งบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และมีผลที่สำคัญคือสามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 ชั่วโมง เพราะคอนกรีตมีกำลังสูงทัดเทียมการบ่มปกติเป็นเวลา 28 วัน

2.7.2 การบ่มจีโอโพลิเมอร์

การบ่มก้อนจีโอโพลิเมอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะเวลาในการบ่ม และวิธีการกระตุ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอโพลิเมอร์ โดยการใช้ความร้อนในการบ่มจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัด จีโอโพลิเมอร์สามารถแข็งตัวได้เมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องแต่กระบวนการของการเกิดจีโอโพลิเมอร์จะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มที่นานขึ้นเพื่อที่จะพัฒนากำลังอัดให้ดีขึ้น จึงมีการใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการบ่มก้อนจีโอโพลิเมอร์ เพื่อลดระยะเวลาในการบ่มให้น้อยลง และสามารถเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้น

2.8 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าแรงชนิดอื่นๆมาก ในการออกแบบจึงให้คอนกรีตรับแรงอัด ดังนั้นกำลังต้านทานแรงอัดจึงใช้เป็นเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงอัดนี้จะบอกเป็นกำลังอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแท่งทดสอบมาตรฐานซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

1) แบบหล่อทรงกระบอก (Cylinders) เป็นแท่งทดสอบมาตรฐานของอเมริกา แบบหล่อรูปทรงกระบอกจะมีความสูงเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาดของทรงกระบอกที่ใช้มีหลายขนาด ตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ถึง 900 มิลลิเมตร (36 นิ้ว) ขนาดของทรงกระบอกที่จะใช้ทดสอบขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวม มาตรฐาน American Society for Testing and Materials, ASTM (14 C192 และ 14 C31) กำหนดว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก

จะต้องโตกว่าขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมไม่น้อยกว่า 3 เท่า ในการก่อสร้างโดยทั่วไปขนาดใหญ่ที่สุดของหินประมาณ 25-50 มิลลิเมตร (1-2 นิ้ว) ดังนั้นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) จึงนิยมใช้มากที่สุด

2) แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (Cube) เป็นแห่งทดสอบตามมาตรฐานของอังกฤษ มาตรฐาน British Standards, BS (BS 1881) กำหนดว่าขนาดของทรงลูกบาศก์มีขนาดตั้งแต่ 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ขึ้นไปเช่นเดียวกับทรงกระบอก แต่ที่ใช้เป็นมาตรฐานก็คือขนาด 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) และขนาดโตสุดของหิน ต้องไม่โตกว่า 1/3 ของแบบหล่อทดสอบ เช่น แบบหล่อทดสอบขนาด 150X150X150 มิลลิเมตร ขนาดโตสุดของหินในคอนกรีตคือ 50 มิลลิเมตร หรือ 2 นิ้ว

การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength Testing) ของคอนกรีต เป็นการทดสอบแบบทำลายโดยการหล่อและการทดสอบตัวอย่างทรงลูกบาศก์ตามมาตรฐาน BS 1881 ส่วนการหล่อและบ่มแห่งตัวอย่างทรงกระบอกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-192/C 192M การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตจะต้องอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง แล้วทำการแต่ง (Capping) ผิวด้านบนตัวอย่างให้เรียบ และวางตัวอย่างบนแท่นเครื่องทดสอบให้อยู่ตรงกลาง ทำการกดตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วที่ 0.15-0.35 เมกะปาสคาลต่อวินาที (ASTM C-39/C39M) จนกระทั่งตัวอย่างพังเสียหาย ทำการบันทึกค่าแรงกดและบันทึกรูปแบบการพังเสียหายของตัวอย่าง แล้วทำการคำนวณหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้ค่าแรงกดหารด้วยหน้าตัดการรับแรงของตัวอย่างทดสอบ แสดงดังสมการที่ (2.5)

$$F = P_{\max}/A \quad (2.5)$$

เมื่อ	F	คือ	ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง (เมกะปาสคาล)
	P_{\max}	คือ	ค่าแรงกดสูงสุด (กิโลนิวตัน)
	A	คือ	พื้นที่รับแรงกดของตัวอย่าง (ตารางมิลลิเมตร)

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยตั้งแต่อัตราส่วนผสม การบ่มวัสดุมวลรวม รวมถึงขั้นตอนการผสม เป็นต้น สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกลไกการเกิดกำลังอัดเกิดจากองค์ประกอบสารตั้งต้นที่มีธาตุซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักมีความสำคัญในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ อัตราส่วนซิลิกาและอลูมินามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ อัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาในสารตั้งต้นที่เหมาะสมจะเป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลให้ต่อการเกิดปฏิกิริยาและการจับตัวของพันธะทางเคมีภายในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ ชนิดและความเข้มข้นของด่างอัลคาไลน์ที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เกิดการควบแน่นในโครงสร้างและก้อนวัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น การใช้อุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์ส่งผลต่อ

อัตราการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้น ช่วยเร่งให้เกิดผลิตภัณฑ์และส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดในช่วงต้น การบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้อย่างรวดเร็วและเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วงต้นได้ดี

2.9 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

สำหรับคอนกรีตที่ใช้หินทั่วไป ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ จะถูกควบคุมโดยความพรุน (Capillary Porosity) ของซีเมนต์เพสต์ โดยความพรุนจะมากขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio) และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Degree of Hydration) หากความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่กำหนด ความสามารถซึมผ่านได้จะต่ำ สำหรับเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ W/C ต่ำกว่า 0.60 ซึ่งช่องทางไหลของน้ำ (Capillary) จะถูกแบ่งหรือทำให้แยกออกไม่ต่อเนื่องกัน ในส่วนผสมที่กำหนด W/C ให้ความสามารถซึมผ่านจะลดลงถ้าปูนซีเมนต์มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาการบ่ม และการทำให้คอนกรีตอัดแน่นก็มีผลต่ออัตราการซึมผ่านน้ำ

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำทำได้โดยนำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเดียวกับการทดสอบกำลังอัดมาตัดบริเวณกึ่งกลางของความสูงให้ได้ขนาดความหนาเท่ากับ 4 เซนติเมตร จากนั้นหล่ออีพ็อกซีหนาประมาณ 2.5 เซนติเมตร รอบๆ ผิวด้านข้างของตัวอย่างดังกล่าว แล้วทิ้งไว้ให้แข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบ โดยใช้ความดันของน้ำเท่ากับ 0.5 เมกะปาสคาล หรือ 5 บาร์ ซึ่งเป็นความดันที่ Concrete Society ได้แนะนำไว้สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.6)

$$K = (\rho L g Q) / (P A) \quad (2.6)$$

- เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (เมตรต่อวินาที)
- ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาที²)
- Q คือ อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
- L คือ ความหนาของตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ (เมตร)
- P คือ ความดันน้ำสัมบูรณ์ (กิโลกรัมเมตรวินาที²ต่อตารางเมตร)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ (ตารางเมตร)

ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีต (Permeability of Concrete) ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดต่อความคงทนของคอนกรีตคือ W/C Ratio โดยที่หากคอนกรีตมีค่า W/C Ratio ลดลงคอนกรีตจะมีความแน่นตัวมากขึ้นหรือที่บ่งชี้ว่า การผสมสารจำพวกสารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) ก็มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่าน มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีการยึดและการแยกตัวน้อยลงรวมทั้งความต้องการน้ำในส่วนผสมก็น้อยลงด้วยซึ่งล้วนเป็นผลดีต่อคุณสมบัติ ในความสามารถในการซึมผ่านหากพิจารณาผลทั้งหมดพบว่า การเติมสารกักกระจายฟองอากาศมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ดีขึ้น การผสมสารผสมเพิ่มจำพวกแร่ธาตุ (Mineral Admixture) เช่น ซิลิกาฟูม ก็มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านการต้านทานการซึมผ่านที่ดีขึ้นเช่นกัน ซีเมนต์คอนกรีตโดยทั่วไปมีอัตราการซึมผ่านน้ำประมาณ 1×10^{-12} เมตรต่อวินาที ที่อายุคอนกรีต 28 วัน (คอนกรีตเทคโนโลยี, 2543) ส่วนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีอัตราการซึมผ่านน้ำแตกต่างกันไป ซึ่งเกิดจากสมบัติของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์

2.10 ความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ

โครงสร้างคอนกรีตบางประเภทนั้น นอกเหนือจากการรับน้ำหนักบรรทุกตามปกติโดยทั่วไปแล้ว ผิวหน้าของคอนกรีตยังมีการสัมผัส ชัดสี หรือการเคลื่อนที่ไปมาของวัตถุต่างๆ ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตเกิดหลุดร่อนได้ ซึ่งจะทำความเสียหายให้กับโครงสร้างคอนกรีตโดยตรง นั่นคือการเสียดสีของเนื้อคอนกรีต ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และในอีกส่วนหนึ่งก็คือ บริเวณผิวคอนกรีตที่สึกกร่อนนั้นจะกลายเป็นจุดด้อย ไม่แข็งแรง ความชื้นหรือสารละลายชนิดต่างๆสามารถซึมเข้าไปได้ง่ายกว่าปกติ ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น ลักษณะของการสึกกร่อนแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

- 1) การสึกกร่อนเนื่องจากรถยนต์บรรทุกที่มีน้ำหนักเบาหรือจากคนเดินเท้าหรือจากการลื่นไถลของวัตถุบนของผิวคอนกรีต
- 2) การสึกกร่อนของผิวคอนกรีตเนื่องจากการบรรทุกขนาดใหญ่หรือพวงรถดินตะขบ
- 3) การสึกกร่อนของโครงสร้างสัมผัสน้ำ เช่น เขื่อน รางระบายน้ำ อุโมงค์ส่งน้ำ หรือตอม่อสะพาน ซึ่งการกัดกร่อนเหล่านี้เกิดจากกระแสน้ำไหล
- 4) การสึกกร่อนของโครงสร้างกั้นน้ำในประเภทที่ 3 เกิดจากการไหลของน้ำที่มีความเร็วสูงทำให้เกิดฟองอากาศและการกัดกร่อนที่เรียกว่า Cavitation นอกจากนี้ยังมีการสึกกร่อนอื่นอีก เช่น ลมที่หอบเอาทรายมาปะทะกับผิวหน้าก็สามารถทำให้เกิดการสึกกร่อนได้

ความสามารถในการต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของคอนกรีต ลักษณะโครงสร้าง การใช้งาน และทุกขั้นตอนของกระบวนการ

ผลิตคอนกรีตล้วนเป็นปัจจัยทั้งหมด ซึ่งในแต่ละปัจจัยก็มีอิทธิพลต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตมากน้อยแตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่สำคัญ ได้แก่

1) กำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนได้ดี การใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณสูงในส่วนผสมหรือการใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (W/C) ต่ำ ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูง มีปริมาณของซีเมนต์เพสต์มากพอที่จะสามารถเคลือบและยึดเหนี่ยวอนุภาคของมวลรวมได้อย่างดีและแข็งแรง ในขณะที่เดียวกันช่องว่างหรือโพรงในเนื้อคอนกรีตมีขนาดและปริมาณไม่มาก เนื่องจากการใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่มากทำให้เหลือน้ำส่วนเกิน (Excess Water) น้อย น้ำในส่วนนี้จะไปก่อให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำในส่วนผสมต่ำจึงมีความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตสูงและมีโพรงเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้ความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตดีขึ้น (สหลาภ หอมวุฒิวงศ์, 2557)

2) มวลรวม มีอิทธิพลต่อสมบัติด้านการต้านทานการสึกกร่อนค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาในคอนกรีตกำลังต่ำ แต่ผลดังกล่าวจะลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามวลรวมหยาบที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องมีความแข็งแรงและขนาดโตสุดควรมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 25 มิลลิเมตร โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะมีการต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ สำหรับมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมนั้นต้องมีความสะอาด มีสัดส่วนคละและการกระจายตัวที่ดี ปริมาณและอัตราส่วนระหว่างมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดต้องมีความเหมาะสม ไม่ควรใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งมากเกินไป ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานการสึกกร่อนได้ดีขึ้น

3) การตกแต่งผิวหน้าของคอนกรีตสด เช่น การขัดผิวหน้าของคอนกรีต ทั้งการขัดผิวหยาบ หรือการขัดผิวมัน ต่างก็ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งแรงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้มีการขัดผิวหน้า เพราะในทางปฏิบัติจะเป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ลงไปในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีของการขัดผิวมัน หรือเป็นการลดปริมาณน้ำสำหรับกรณีของการขัดผิวหยาบ การใช้ซีเมนต์ชนิดพิเศษหรือวัสดุเคลือบผิวหน้าก็จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของผิวหน้าของคอนกรีต เช่น ผิวพื้นโรงงานอุตสาหกรรม ในทางตรงกันข้าม ส่วนผสมคอนกรีตที่มีน้ำค่อนข้างมากและน้ำส่วนเกินขึ้นมาอยู่บนผิวหน้าของคอนกรีตขณะที่กำลังจะแข็งตัว เมื่อแข็งตัวแล้วความต้านทานต่อการสึกกร่อนจะค่อนข้างต่ำมาก เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ผิวหน้ามีค่าสูงขึ้นทำให้กำลังของเพสต์ต่ำ ส่งผลให้ผิวหน้าคอนกรีตและอนุภาคของมวลรวมหลุดร่อนออก โดยสามารถพบได้ในถนนหรือทางสัญจรที่ผิวหน้าหลุดร่อนจนเห็นผิวของหินหรือมวลรวมหยาบ

4) การบ่มคอนกรีต เป็นการรักษาน้ำหรือความชื้นในเนื้อคอนกรีตสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในระยะหลัง ทำให้กำลังหรือความแข็งแรงของคอนกรีตพัฒนาสูงขึ้นเมื่ออายุผ่านไป ดังนั้นกำลังของคอนกรีตที่ได้รับการบ่มอย่างดีจะสูงกว่าของคอนกรีตที่

ไม่ได้รับการบ่ม เมื่อคอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น คุณสมบัติทางด้านการต้านทานการสึกกร่อนก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

5) ปริมาณโพรงหรือช่องว่างในคอนกรีต โดยที่คอนกรีตมีปริมาณโพรงหรือช่องว่างในคอนกรีตปริมาณมากจะส่งผลให้มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนลดลง เนื่องจากการเคลือบหรือการเชื่อมประสานอนุภาคของมวลรวมละเอียดโดยซีเมนต์เพสต์ไม่สมบูรณ์ ทำให้อนุภาคเหล่านั้นเมื่อถูกแรงกระทำก็จะหลุดร่อนได้ง่าย และอีกประการหนึ่งคือ เมื่อเริ่มมีการสึกกร่อนเกิดขึ้นและผิวของคอนกรีตหลุดร่อนขยายลึกลงไปจนถึงโพรงหรือช่องว่างที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้ความลึกของการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดความเสียหายจากการสึกกร่อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้คอนกรีตที่มีความพรุนสูงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นโครงสร้างที่ต้องอยู่ในสภาวะที่มีการสึกกร่อนสูง

การทดสอบหาค่าต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำหรือตามมาตรฐาน ASTM C1138 เป็นการหาค่าการสึกกร่อนของตัวอย่างคอนกรีต โดยการนำตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร หนา 100 มิลลิเมตร ไปติดตั้งไว้ในชุดถังทดสอบ มีลูกโลหะสแตนเลสกลม 3 ขนาด มีจำนวนแตกต่างกัน ถูกนำมาวางอยู่บนผิวหน้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ทำการเติมน้ำสะอาดให้สูงกว่าผิวคอนกรีตประมาณ 16 เซนติเมตร แล้วกวนน้ำในถังด้วยใบพัดขนาดตามมาตรฐานกำหนด ด้วยความเร็ว $1,000 \pm 100$ รอบต่อนาที ลูกโลหะสแตนเลสทั้ง 3 ขนาดก็จะเคลื่อนที่ตามการไหลวนของน้ำไปมาบนผิวของก้อนตัวอย่างเมื่อครบเวลา 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างคอนกรีตออกมาทำความสะอาดและประเมินการสึกกร่อนด้วยการชั่งน้ำหนัก เสร็จแล้วนำตัวอย่างกลับเข้าไปในถังทดสอบอีกครั้งเพื่อทำตามกระบวนการเดิมอีกจำนวน 5 รอบ เมื่อเสร็จแล้วก็ทำการคำนวณหาอัตราการสึกกร่อนของตัวอย่างคอนกรีตจากการทดสอบในแต่ละรอบ จะได้ข้อมูลของน้ำหนักก้อนตัวอย่างที่ชั่งในน้ำและชั่งในอากาศ ชั่งน้ำหนักทั้งสองชนิดควรจะลดลงเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบเพิ่มมากขึ้น นำค่าน้ำหนักที่วัดมาทำการคำนวณให้เป็นปริมาตรของก้อนตัวอย่างในแต่ละรอบของการทดสอบ และเมื่อครบทั้ง 6 รอบการทดสอบ จะเป็นปริมาตรรวมที่ลดลง ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างก่อนเริ่มต้นการทดสอบ และมาตรฐานได้ระบุไว้ว่าต้องใช้คอนกรีตอย่างน้อย 3 ตัวอย่างต่อคอนกรีตหนึ่งชนิด

การคำนวณค่าการสึกกร่อนตามมาตรฐาน ASTM C1138 ได้แก่ ปริมาตรของตัวอย่าง ณ ระยะเวลาใดๆ ปริมาตรของตัวอย่างที่สูญเสียโดยการขัดสี และความลึกเฉลี่ยของการขัดสี แสดงในสมการที่ 2.7 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

$$V_t = (W_{\text{air}} - W_{\text{water}})/G_w \quad (2.7)$$

เมื่อ V_t คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ณ ระยะเวลาใดๆ (ลูกบาศก์เมตร)

W_{air} คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ ณ ระยะเวลาใดๆ (กิโลกรัม)

W_{water} คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ ณ ระยะเวลาใดๆ (กิโลกรัม)

G_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$$VL_t = V_i - V_t \quad (2.8)$$

เมื่อ VL_t คือ ปริมาตรของตัวอย่างที่สูญเสียโดยการซัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

V_i คือ ปริมาตรของตัวอย่างก่อนการทดสอบการซัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

V_t คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ที่หลังการทดสอบการซัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

$$ADA_t = VL_t/A \quad (2.9)$$

เมื่อ ADA_t คือ ความลึกเฉลี่ยของการซัดสี (เมตร)

VL_t คือ ปริมาตรของตัวอย่างที่สูญเสียโดยการซัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดด้านบนของตัวอย่าง (ตารางเมตร)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ludirdja และคณะ (1989) เสนอวิธีการวัดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตโดยอาศัยหลักการไหลของน้ำตามแรงโน้มถ่วงของโลก และวัดที่อัตราการไหลเป็นเวลา 20 วัน แล้วใช้ค่า 7 วันสุดท้ายเพื่อมาคำนวณหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เมื่ออัตราการไหลของน้ำที่ผ่านคอนกรีตคงที่ จึงสามารถคำนวณหาค่าการซึมผ่านคอนกรีต พบว่า คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษ้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้ เถ้าชานอ้อยที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่างกัน โดยนำเถ้าชานอ้อยมาบดให้มีขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรง เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แม้ว่าคอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ยังมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

Ganesan และคณะ (2007) นำเก้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลในประเทศอินเดียมาปรับปรุงคุณภาพโดยเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสและบดละเอียดโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 5.4 ไมโครเมตร และมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 4.9 โดยนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเก้าชานอ้อย มีคุณสมบัติที่ดีกว่าหรือเทียบเท่าคอนกรีตควบคุม เช่น เพิ่มความสามารถในการทำงานได้ (Workability) กำลังอัดของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

Chusilp และคณะ (2009) นำเก้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาผ่านกระบวนการทำให้มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงและต่ำ คือ ร้อยละ 10 และ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI สูงมีการพัฒนา กำลังต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเก้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI ต่ำ แต่ในช่วงอายุปลายมอร์ตาร์ทั้งสองสามารถพัฒนา กำลังอัดได้สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนั้นการแทนที่เก้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณ ร้อยละ 10 มีความต้านทานซัลเฟตและลดการขยายตัวได้ดีที่สุด แต่การแทนที่เก้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI มากกว่าร้อยละ 10 มีการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนของซัลเฟตมาก โดยเฉพาะการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 30 และ 40

Ubolluk Rattanasak และ Prinya Chindapasirt (2009) ศึกษาการชะล้างของเก้าชานอ้อยผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์ สำหรับการชะล้างของซิลิกาและอลูมินา ทำการศึกษาโดยการผสมเก้าชานอ้อยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงเวลาต่างๆ และทำการพิจารณาการใช้ซิลิกาและอลูมินาในการผลิตจีโอโพลิเมอร์โดยทำการศึกษาแบบแยกสัดส่วนการผสมและการผสมแบบปกติ สำหรับการแยกเป็นสัดส่วนการผสมนั้นใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับเก้าชานอ้อยเป็นเวลา 10 นาทีก่อน จึงเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสม ส่วนการผสมแบบปกตินั้น เก้าชานอ้อย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตถูกผสมในเวลาเดียวกัน แล้วบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการชะล้างของเก้าชานอ้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการผสม สำหรับขั้นตอนการผสมนั้นแบบแยกสัดส่วนการผสมให้กำลังอัดดีกว่าการผสมแบบปกติ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงถึง 70.0 เมกะปาสคาล เมื่อผสมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และใช้วิธีการผสมแยกสัดส่วน

เพ็ญชาย เวียงใต้ (2553) ศึกษาความคงทนของคอนกรีตผสมเก้าชานอ้อยบดละเอียด โดยใช้เก้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จังหวัดชัยภูมิ เผาซ้ำที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำ

ถ้าชานอ้อยก่อนและหลังการเผาอบทำให้มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 30-35 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 และ 40 โดยน้ำหนัก หลอมอร์ต้าร์สำหรับศึกษากำลังอัด การสูญเสียกำลังอัดและการขยายตัว เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในกรดซัลฟูริก โดยทดสอบที่อายุ 7 28 90 และ 180 วัน พบว่าการเผาและการอบถ้าชานอ้อยช่วยปรับปรุงคุณภาพของถ้าชานอ้อยให้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดและคุณสมบัติด้านความคงทนดีขึ้น ถ้าชานอ้อยหลังการเผามีความต้องการน้ำน้อยกว่าถ้าชานอ้อยก่อนการเผา โดยมอร์ต้าร์ที่ผสมถ้าชานอ้อยหลังการเผาและอบให้มีอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัด การต้านทานการสูญเสียกำลังอัด การต้านทานการสูญเสียน้ำหนักและการต้านทานการขยายตัวได้ดีที่สุด

รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) การปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าแทนหินปูนย่อยเพื่อผลิตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า และใช้ถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้ถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัดในช่วงอายุปลาย ความทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูง คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยการใช้ถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้ถ้าชานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้สูงขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

Montakamtiwong และคณะ (2013) ได้นำถ้าชานอ้อยจาก 2 แหล่ง ที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) แตกต่างกันมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ศึกษาผลกระทบของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ความละเอียด และการแทนที่ถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อกำลังอัดและความร้อนของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าการใช้ถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ต่ำจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูงอยู่เล็กน้อย การแทนที่ถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI ต่ำ ในปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ 28 วัน นอกจากนั้นการ

แทนที่ เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปูนซีเมนต์สามารถลดอุณหภูมิของคอนกรีตสดได้ร้อยละ 13-37 ของคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยและค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา

Rukzon และ Chindaprasirt (2012) ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดสูง สามารถนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังอัดสูง จากการนำเถ้าชานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ใน อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 เมื่อกำหนดปริมาณวัสดุผสมรวม 560 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมเท่ากับ 0.30 สารลดน้ำพิเศษ 19.50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าคอนกรีต ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดมากกว่า 65 เมกะ ปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และสมบัติความทนทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการ เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น

Castaldilli และคณะ (2016) ศึกษาาระบบไบนารี (Binary System) เถ้าลอยต่อ เถ้าชานอ้อย (FA/SCBA) ในสารละลายซิลิกาต่อโพแทสเซียม ($\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$) เป็นสารยึดเกาะคัลคาไลน์ พบว่าสารยึดเกาะอัลคาไลน์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย (FA/SCBA) สามารถใช้งานได้ อิทธิพลของ อัตราส่วนโมเลกุล $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ ของสารละลาย ในการกระตุ้นมีผลต่อการรับแรงอัดและการพัฒนา โครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิการบ่มที่ 65 องศาเซลเซียส ผลกระทบจากอัตราส่วน FA/SCBA พบว่ามี บทบาทสำคัญ จากการศึกษาสมบัติด้านโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ อุณหภูมิห้อง และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วน FA/SCBA เท่ากับ 75/25 แสดงให้เห็นถึง ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับสารผสมที่ใช้สารอัลคาไลน์โดยใช้สารละลายอัตราส่วนโมลาร์ $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ เท่ากับ 0.75

Lateef N. Assi และคณะ (2016) ศึกษาถึงผลกระทบของการใช้ชนิดของสารละลาย ขึ้นตอนการบ่ม และแหล่งเถ้าลอยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย โดยศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและได้ทำการวัดความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และช่องว่าง โดยใช้สารละลาย 2 ชนิดคือ ก) ส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซิลิกาฟุ้งและน้ำ และ ข) ส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกตและน้ำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ใช้สารละลายทั้งสองชนิดมีศักยภาพในการรับแรงอัดสูง กำลังรับแรงอัดได้รับผลกระทบ โดยตรงจากแหล่งเถ้าลอย ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดไม่ได้รับผลกระทบอย่างมี นัยสำคัญจากสภาพการบ่มเมื่อมีการใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารละลายที่ทำปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับการใช้ โซเดียมซิลิเกต

Marios Soutsos และคณะ (2016) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย (FA) อุณหภูมิในการบ่มมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ จาก FA ตัวอย่างที่บ่มอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงกว่าตัวอย่างที่บ่มอุณหภูมิ 50 องศา

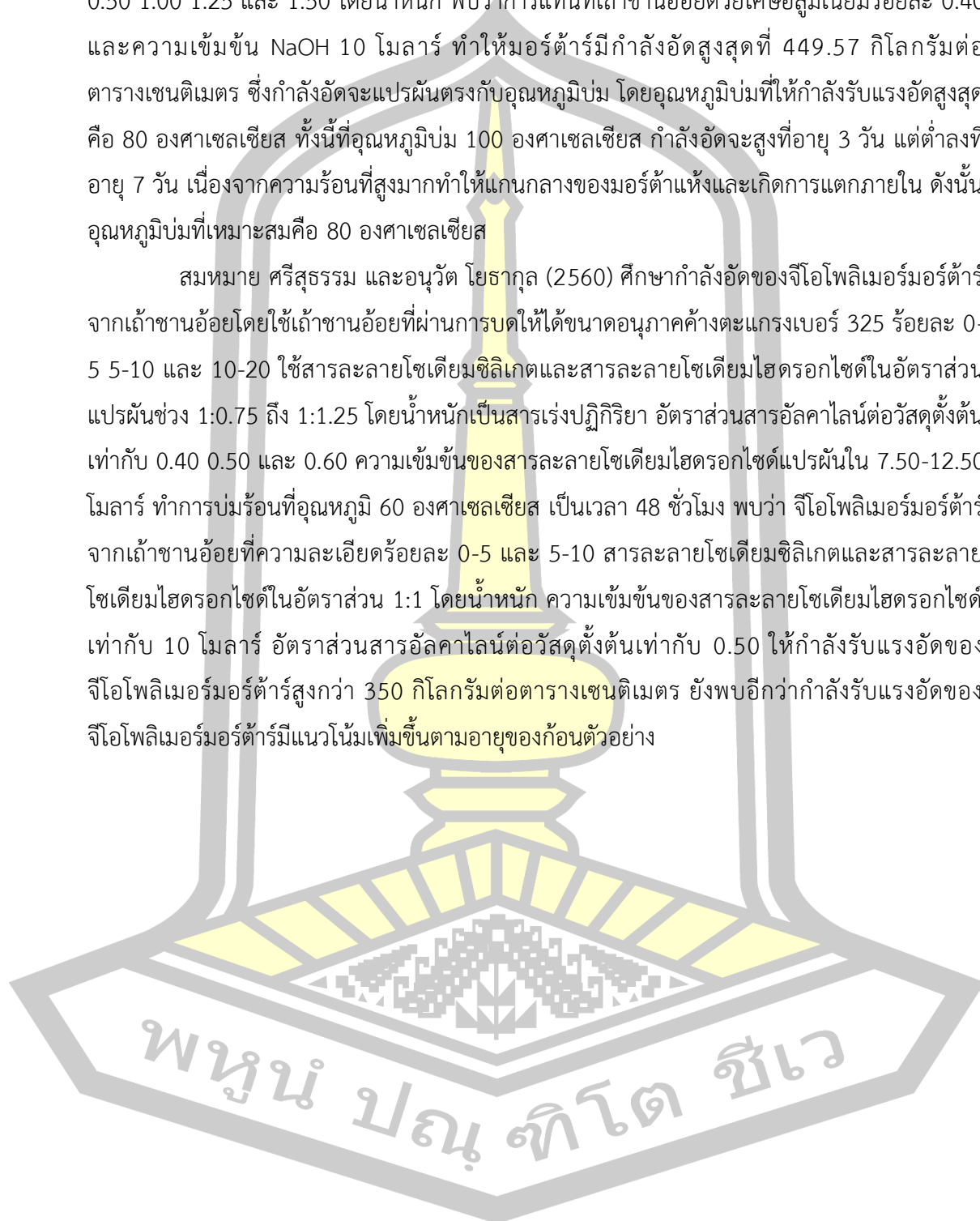
เซลเซียส ระยะเวลาก่อนบ่มมีความสำคัญรองลงมาซึ่งระยะเวลา 1 ชั่วโมงก่อนการบ่มร้อนถือว่าเพียงพอ ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญมาก ไม่เพียงช่วยในเรื่องความสามารถในการทำงานได้ในอายุต้นเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อความสามารถรับแรงอัด อัลคาไลน์โมดูลัสที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณสารอัลคาไลน์ร้อยละ 12.5 และอัลคาไลน์โมดูลัส 1.25 ให้กำลังรับแรงอัดประมาณ 70 เมกะปาสคาล สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งที่มา FA ควรมีการตรวจสอบก่อนที่จะเลือกแหล่งที่เหมาะสมที่สุด พบว่าขนาดเฉลี่ยของเถ้าเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด FA ที่หยาบ มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ต่ำ และมีค่า LOI สูง ไม่ควรนำมาใช้แทนที่ FA บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (ggbs) จะทำให้มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ที่กำลัง 80 เมกะปาสคาล โดยใช้ปริมาณสารอัลคาไลน์ร้อยละ 7.5 และอัลคาไลน์โมดูลัส 1.25 เท่านั้น ประโยชน์อื่นส่วนผสมดังกล่าวคือ การบ่มที่อุณหภูมิห้องก็เพียงพอแล้วและไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการบ่มสูง

Wei Zhou และคณะ (2016) ศึกษาผลของโมดูลัสของตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา (Si/Al) อัตราส่วนของน้ำต่อของแข็ง และอุณหภูมิในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมโดยเถ้าลอย 2 ชนิด และศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างและลักษณะทางจุลภาคของผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM-EDS XRD TG-DSC และ FT-IR พบว่าจากการทดลองแบบเชิงตั้งฉากได้เงื่อนไขที่ดีที่สุด (อุณหภูมิการบ่ม 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2:1 อัตราส่วนโมดูลัส เท่ากับ 1.5 อัตราส่วนน้ำต่อของแข็ง เท่ากับ 0.1) สำหรับการเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย Al_2O_3 ต่ำ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอยและสามารถเร่งการพัฒนา กำลังอัดได้อย่างรวดเร็วโดยมีกำลังอัดประมาณ 27 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7 วัน สำหรับโครงสร้างทางจุลภาค XRD แสดงให้เห็นว่าวัสดุเกิดปฏิกิริยาและจีโอโพลิเมอร์ค่อยๆ พัฒนารูปแบบโครงสร้างที่หนาแน่นในผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ ผลของ SEM ยังแสดงให้เห็นถึงกระบวนการสร้างและการแปรสภาพของจีโอโพลิเมอร์ ผลของ SEM และ FTIR ระบุว่าเมื่อค่าโมดูลัสของของสารเร่งปฏิกิริยาอยู่ในระดับต่ำ เถ้าลอยจะถูกทำปฏิกิริยาบางส่วนและส่วนหนึ่งของอนุภาคที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยายังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์ เมื่อค่าโมดูลัสของตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์เกินกว่า 1.8 จะเกิดรอยแตกในโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ การวิเคราะห์ความร้อน TG-DSC แสดงให้เห็นว่าเมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย Al_2O_3 ต่ำ แล้วนั้นจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย Al_2O_3 สูง มีสมบัติที่เหนียวกว่าเนื่องจากการสูญเสียมวลน้อยและความแข็งแรงสูงขึ้นหลังจากบ่มที่อุณหภูมิสูง

ปิยะวัตร เกสร และสุทธิวัชร ฤทธิวัชร (2560) ศึกษา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษขอลูมิเนียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 7.5 10 และ 12.5 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยาต่อวัสดุตั้งต้น (L/VB) เท่ากับ 0.60 อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก แทนที่

เถาขานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมที่ความละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ร้อยละ 0 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 1.00 1.25 และ 1.50 โดยน้ำหนัก พบว่าการแทนที่เถาขานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.40 และความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงสุดที่ 449.57 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งกำลังอัดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิบ่ม โดยอุณหภูมิบ่มที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 80 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ที่อุณหภูมิบ่ม 100 องศาเซลเซียส กำลังอัดจะสูงที่อายุ 3 วัน แต่ต่ำลงที่อายุ 7 วัน เนื่องจากความร้อนที่สูงมากทำให้แกนกลางของมอร์ต่าแห้งและเกิดการแตกภายใน ดังนั้นอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมคือ 80 องศาเซลเซียส

สมหมาย ศรีสุธรรม และอนวัต โยธากุล (2560) ศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาขานอ้อยโดยใช้เถาขานอ้อยที่ผ่านการบดให้ได้ขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0-5 5-10 และ 10-20 ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนแปรผันช่วง 1:0.75 ถึง 1:1.25 โดยน้ำหนักเป็นสารเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.40 0.50 และ 0.60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แปรผันใน 7.50-12.50 โมลาร์ ทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาขานอ้อยที่ความละเอียดร้อยละ 0-5 และ 5-10 สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.50 ให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงกว่า 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ยังพบอีกว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของก้อนตัวอย่าง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาผลกระทบจากการใช้เศษอลูมิเนียมเพื่อเติมอลูมินาในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ศึกษาผลจากการใช้เถ้าชานอ้อยจาก 2 แหล่ง เป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต รวมถึงศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิบ่มและปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนที่ 2 จากผลการศึกษาส่วนที่ 1 ทราบถึงผลกระทบจากการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมและแหล่งที่มาของเถ้าชานอ้อยต่อการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จึงนำส่วนผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงมาพัฒนาต่อ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการลดอุณหภูมิบ่ม ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ชนิดมวลรวมหยาบที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต และการปรับเถ้าชานอ้อยโดยผ่านกระบวนการเผาซ้ำ (เพ็ญชาย เวียงใต้, 2553) ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด อัตราการซึมผ่านของน้ำ และความต้านทานการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. เถ้าชานอ้อยจาก 2 แหล่ง ได้แก่ แหล่ง A เถ้าชานอ้อยจากโรงน้ำตาล อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ และแหล่ง B เถ้าชานอ้อยจากโรงน้ำตาล อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดมหาสารคาม เป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยนำมาผ่านกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกัน 2 แบบ ดังนี้

1.1) เถ้าชานอ้อยตั้งเดิมจากแหล่ง (OBA) เตรียมโดยนำเถ้าชานอ้อยไปอบให้แห้ง แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และนำมาร้อนให้มีความละเอียดค้ำบนตระแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

1.2) เถ้าชานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำ (RBA) เตรียมโดยนำเถ้าชานอ้อยไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และนำมาร้อนให้มีความละเอียดค้ำบนตระแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

2. เศษอลูมิเนียม (ALW) ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากงานติดตั้งประตูและหน้าต่าง โดยนำมา ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20

3. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายที่มีโมดูลัสความละเอียด (FM.) 2.5 ถึง 2.7
4. มวลรวมหยาบ ใช้หิน 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อยและกรวด ขนาด 3/8 นิ้ว
5. น้ำกลั่นใช้สำหรับเป็นตัวผสมเพื่อเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยนำมาละลายกับน้ำกลั่นทิ้งให้เย็นตัว 24 ชั่วโมง
7. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ NaO_2 ร้อยละ 15.32 SiO_2 ร้อยละ 32.87 และ H_2O ร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องทดสอบกำลังอัด 100 ตัน (Universal Testing Machine)
2. เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส (Electric Furnace)
3. เครื่องทดสอบการสึกกร่อน (Abrasion Testing Machine)
4. เครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ (Permeability Testing Machine)
5. เครื่องบด (Grinding Machine)
6. เครื่องร่อนแบบตะแกรง (Sieve Shaker Machine)
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Weight Scale) ความละเอียด 1.00 และ 0.01 กรัม
8. เครื่องเขย่าคอนกรีตแบบโต๊ะ (Vibrating Table)
9. เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixer Machine)
10. เตาอบไฟฟ้า (Electric Oven)
11. ตะแกรงร่อน (Sieve) ทราย เบอร์ 20, 40 และ 325
12. ตะแกรงร่อน (Sieve) หิน ขนาด 3/4 นิ้ว 1/2 นิ้ว 3/8 นิ้ว และ Pan
13. ปีกเกอร์ขนาดความจุ 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
14. แท่งแก้วทวนสาร
15. แบบหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
16. แบบหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร
17. แบบหล่อคอนกรีตขนาด 10x10x10 เซนติเมตร

3.4 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) ของเถ้าชานอ้อยจาก 2 แหล่ง เถ้าชานอ้อยดั้งเดิมจากแหล่งและเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำ โดยเถ้าทั้ง 2 ชนิด ผ่านการบดให้มีความละเอียดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
2. ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) เถ้าชานอ้อยดั้งเดิมจากแหล่งและเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำ
3. ทดสอบค่าโมดูลัสความละเอียด มาตรฐาน ASTM C136-95 และการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดมาตรฐาน ASTM C128 ทดสอบการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ มาตรฐาน ASTM C117

3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

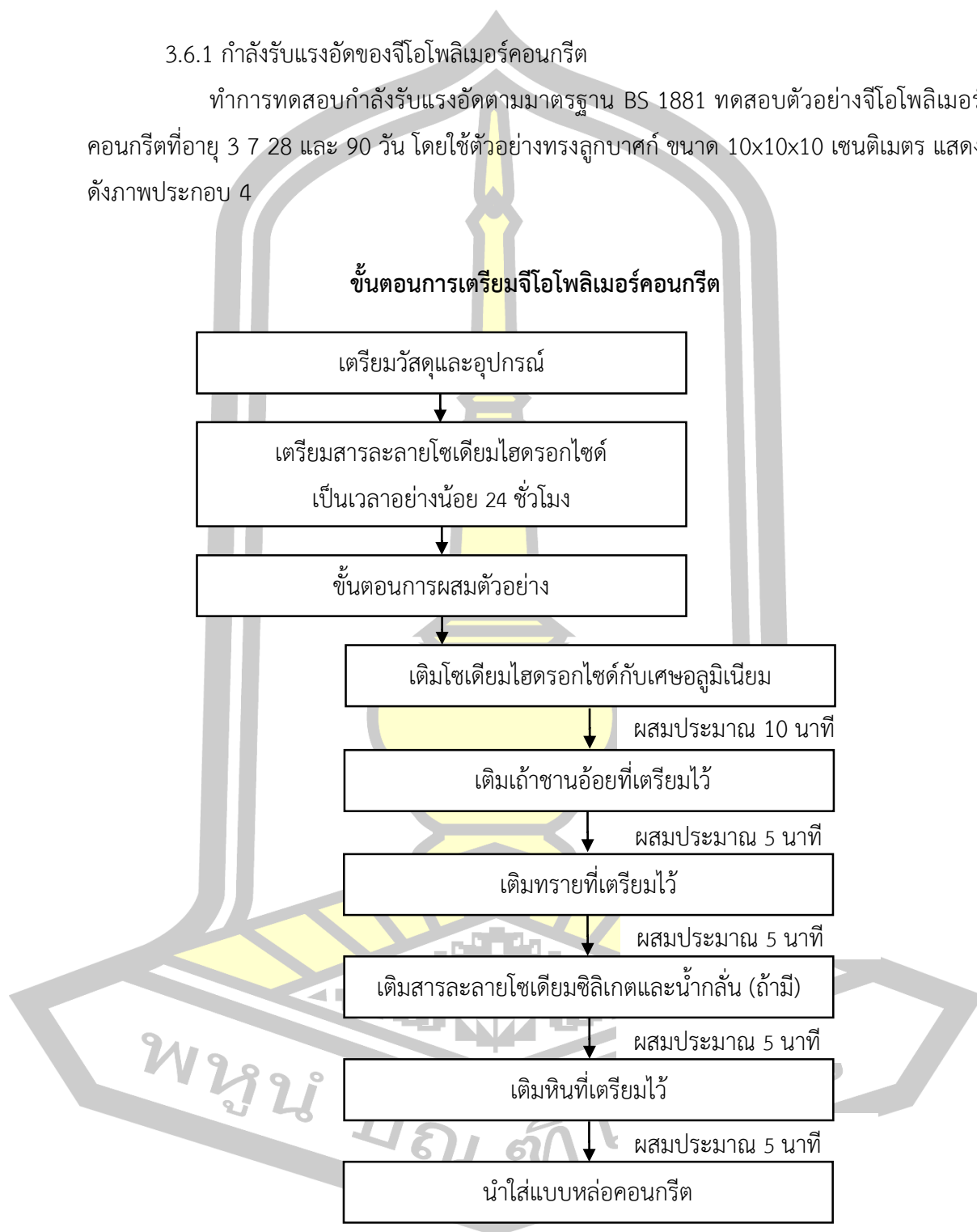
ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีอัตราส่วนผสมระหว่าง เถ้าชานอ้อย:มวลรวมละเอียด:มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1.00:1.35:3.00 โดยน้ำหนัก การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังภาพประกอบ 3 มีรายละเอียดดังนี้

- 1) จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
- 2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้ผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
- 3) ทำการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยเริ่มจากผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเศษอลูมิเนียมลงในภาชนะหรือเครื่องผสมคอนกรีตให้เศษอลูมิเนียมถูกชะละลาย (Leaching) ประมาณ 10 นาที หรือจนกว่าเศษอลูมิเนียมจะถูกชะละลายจนหมด จากนั้นเติมเถ้าชานอ้อยที่เตรียมไว้ ผสมต่ออีกประมาณ 5 นาที เติมทรายที่เตรียมไว้ ผสมต่ออีกประมาณ 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ผสมต่ออีกประมาณ 5 นาที เติมหินที่เตรียมไว้แล้วผสมต่อเนื่องให้เป็นเนื้อเดียวกัน (กิตติพงษ์ มาโยธา และวัชรพงษ์ ฮุยอวน, 2560; สมหมาย ศรีสุธรรม และอนุวัต โยธากุล, 2560) จากนั้นนำไปแบบหล่อคอนกรีต และปิดแบบหล่อด้วยพลาสติกฟิล์ม
- 4) การบ่มตัวอย่าง หลังจากนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่ในแบบหล่อและปิดแบบหล่อด้วยพลาสติกฟิล์มแล้ว เก็บตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปใส่ตู้อบตามอุณหภูมิที่กำหนดระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากตู้อบและเก็บตัวอย่างในอุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบ

3.6 การทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

3.6.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน BS 1881 ทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร แสดงดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 3 ขั้นตอนการเตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพประกอบ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างทรงลูกบาศก์

3.6.2 การซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร นำมาตัดตามขวางที่บริเวณกึ่งกลางความสูงให้ได้ความหนา 5 เซนติเมตร ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำที่ความดัน 1 บาร์ (ไม่สามารถทำการทดสอบโดยใช้ความดันของน้ำ เท่ากับ 5 บาร์ ซึ่งเป็นความดันที่ Concrete Society ได้แนะนำไว้ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีอัตราการซึมผ่านของน้ำค่อนข้างสูง ไม่สามารถบันทึกอัตราการไหลจากการทดสอบที่ความดันของน้ำ 5 บาร์ ในการทดสอบจึงลดความดันของน้ำ เท่ากับ 1 บาร์) ตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับทดสอบแสดงดังภาพประกอบ 5



(ก) ตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านน้ำ

(ข) เครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ

ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างและเครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ

3.6.3 การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1138 (Under Water Method) ทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปแช่น้ำหนักแล้วนำไปติดตั้งในเครื่องทดสอบการสึกกร่อนใต้น้ำ โดยด้านบนของตัวอย่างมีลูกโลหะสแตนเลสที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.3 19.0 และ 12.6 มิลลิเมตร ตัวอย่างและเครื่องทดสอบแสดงภาพประกอบ 6



(ก) ตัวอย่างทดสอบการสึกกร่อน



(ข) เครื่องทดสอบการสึกกร่อน

ภาพประกอบ 6 ตัวอย่างและทดสอบการสึกกร่อน

3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

การทดสอบส่วนที่ 1 ศึกษาผลต่อสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

- 1) ศึกษาผลของการใช้เถ้าขาน้อยจาก 2 แหล่ง (แหล่ง A และ B)
- 2) ศึกษาผลของการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอลูมิเนียม โดยมีการแทนที่เศษอลูมิเนียมในเถ้าขาน้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนัก
- 3) ศึกษาผลของการบ่มร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีระยะเวลาก่อนการเข้าบ่มร้อน 1 ชั่วโมง
- 4) ศึกษาผลของปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ โดยกำหนดให้เป็นอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าขาน้อย อัตราส่วน 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

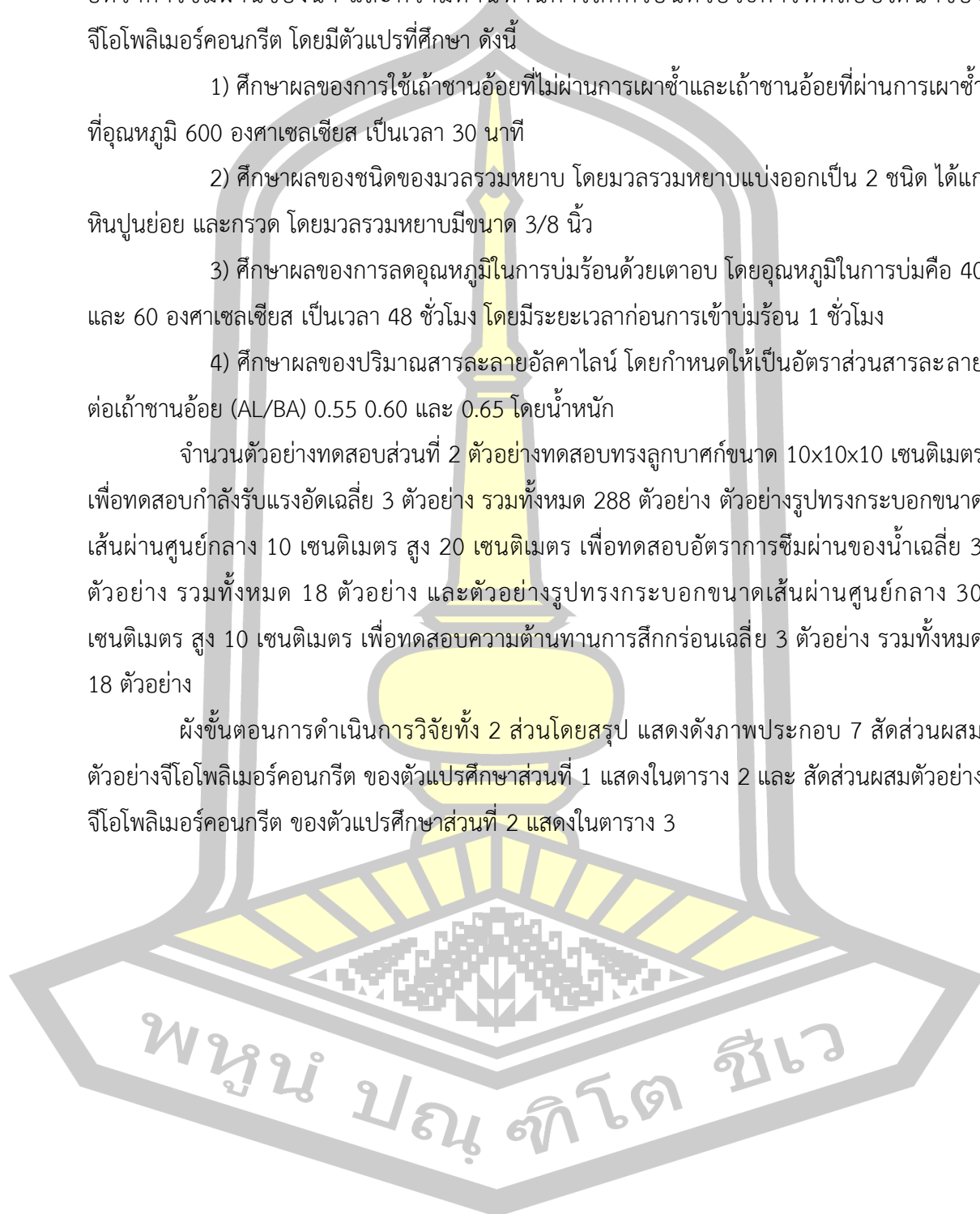
จำนวนตัวอย่างทดสอบส่วนที่ 1 เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ที่ใช้ทดสอบทั้งหมด 153 ตัวอย่าง

การทดสอบส่วนที่ 2 ศึกษาผลต่อสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน อัตราการซึมผ่านของน้ำ และความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบได้น้ำของ จีไอโพลีเมอร์คอนกรีต โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

- 1) ศึกษาผลของการใช้เถ้าขานอ้อยที่ไม่ผ่านการเผาซ้ำและเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- 2) ศึกษาผลของชนิดของมวลรวมหยาบ โดยมวลรวมหยาบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อย และกรวด โดยมวลรวมหยาบมีขนาด $3/8$ นิ้ว
- 3) ศึกษาผลของการลดอุณหภูมิในการบ่มร้อนด้วยเตาอบ โดยอุณหภูมิในการบ่มคือ 40 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีระยะเวลาก่อนการเข้าบ่มร้อน 1 ชั่วโมง
- 4) ศึกษาผลของปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ โดยกำหนดให้เป็นอัตราส่วนสารละลาย ต่อเถ้าขานอ้อย (AL/BA) 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

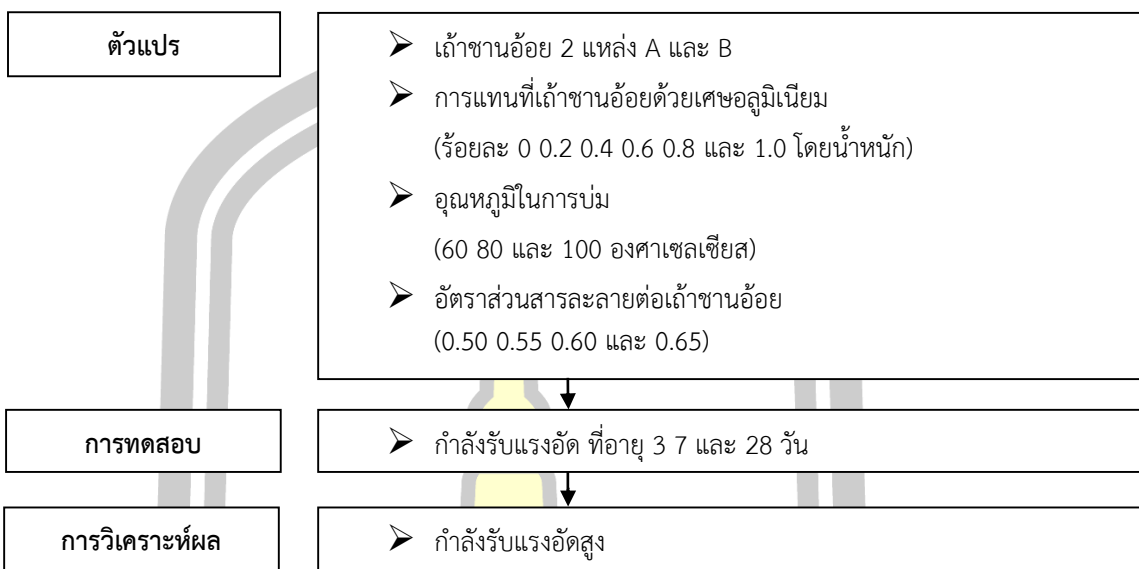
จำนวนตัวอย่างทดสอบส่วนที่ 2 ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 288 ตัวอย่าง ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 18 ตัวอย่าง และตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 18 ตัวอย่าง

ผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัยทั้ง 2 ส่วนโดยสรุป แสดงดังภาพประกอบ 7 สัดส่วนผสม ตัวอย่างจีไอโพลีเมอร์คอนกรีต ของตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1 แสดงในตาราง 2 และ สัดส่วนผสมตัวอย่าง จีไอโพลีเมอร์คอนกรีต ของตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2 แสดงในตาราง 3

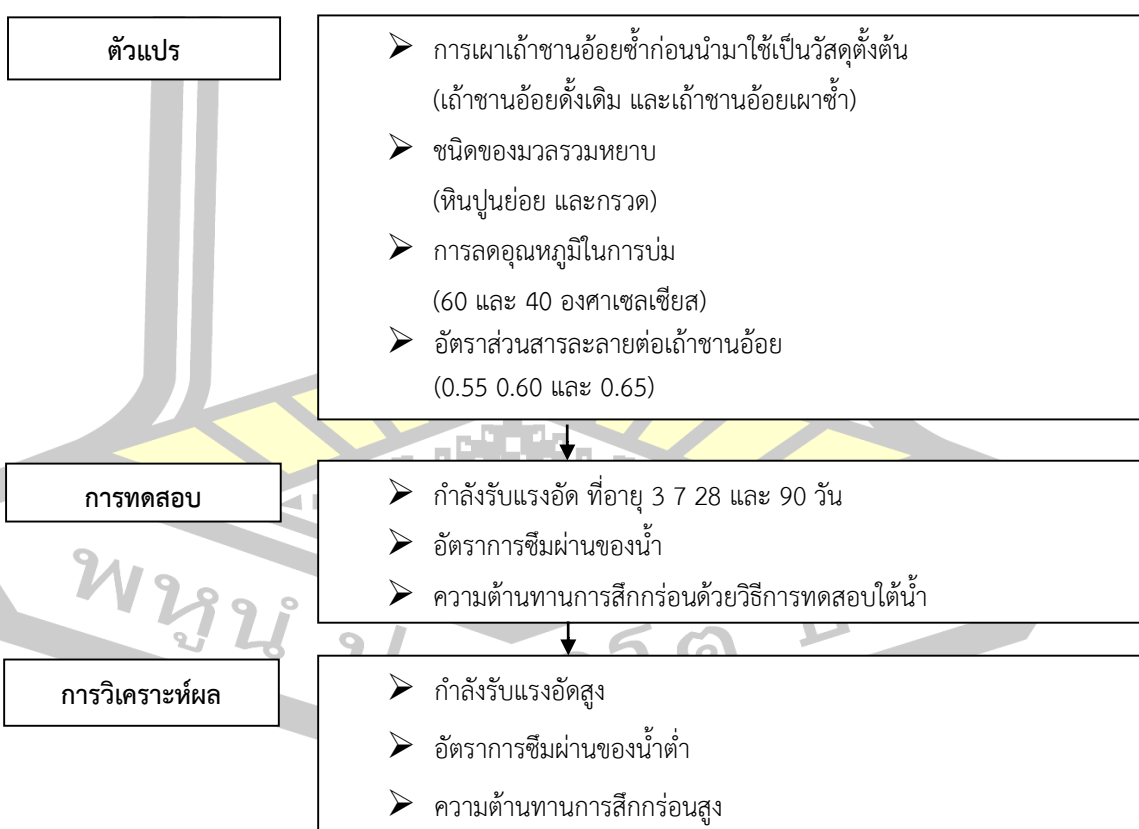


ผังขั้นตอนการดำเนินการ

การดำเนินการส่วนที่ 1



การดำเนินการส่วนที่ 2



ภาพประกอบ 7 ผังขั้นตอนการดำเนินการ

3.8 คำอธิบายสัญลักษณ์ในงานวิจัย

คำอธิบายสัญลักษณ์ชื่อส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบ มีตัวอย่างดังต่อไปนี้

การทดสอบส่วนที่ 1

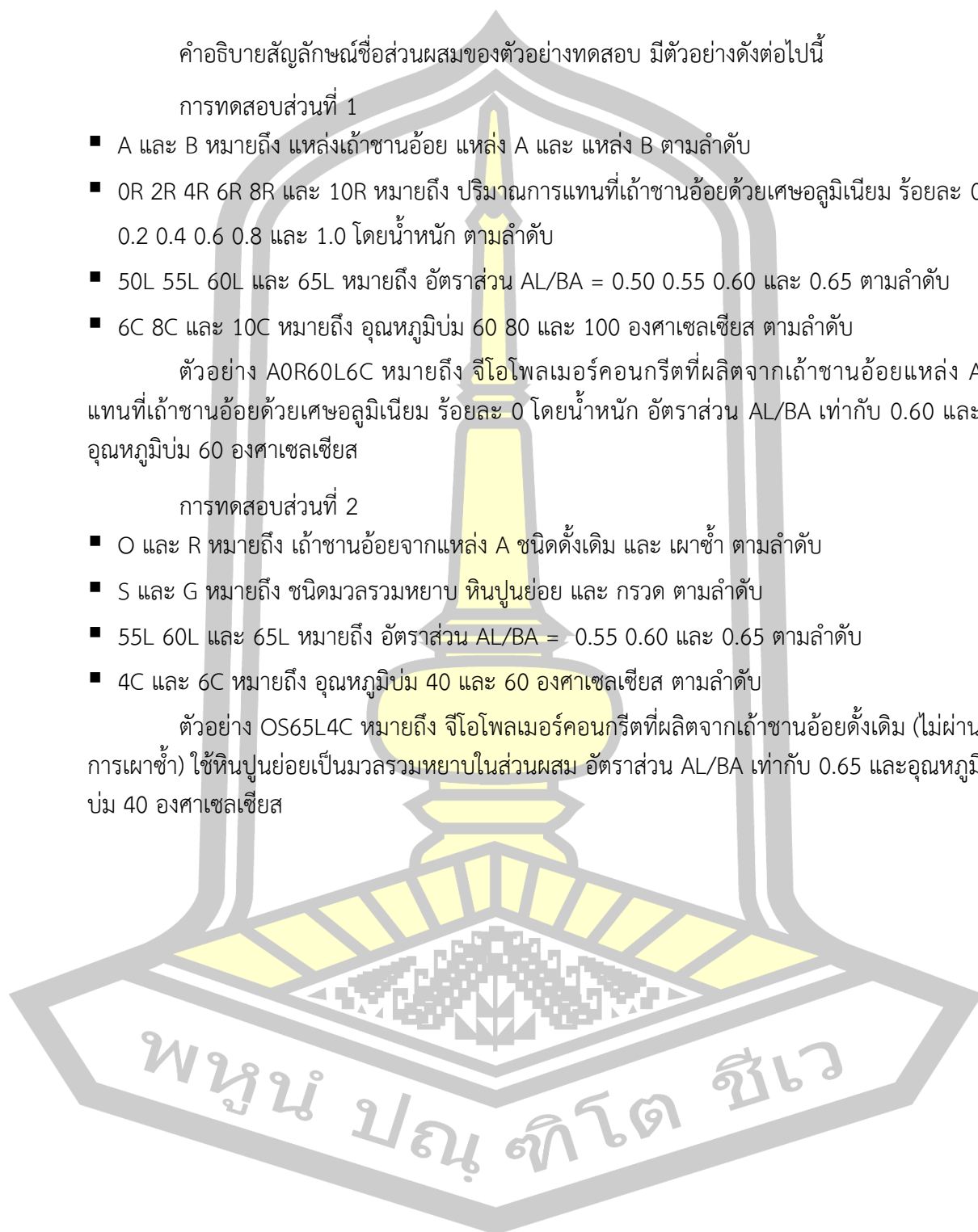
- A และ B หมายถึง แหล่งเถ้าขานอ้อย แหล่ง A และ แหล่ง B ตามลำดับ
- 0R 2R 4R 6R 8R และ 10R หมายถึง ปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียม ร้อยละ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
- 50L 55L 60L และ 65L หมายถึง อัตราส่วน AL/BA = 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ
- 6C 8C และ 10C หมายถึง อุณหภูมิบ่ม 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตัวอย่าง A0R60L6C หมายถึง จีโอโพลเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A แทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียม ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 และ อุณหภูมิบ่ม 60 องศาเซลเซียส

การทดสอบส่วนที่ 2

- O และ R หมายถึง เถ้าขานอ้อยจากแหล่ง A ชนิดดั้งเดิม และ เผาซ้ำ ตามลำดับ
- S และ G หมายถึง ชนิดมวลรวมหยาบ หินปูนย่อย และ กรวด ตามลำดับ
- 55L 60L และ 65L หมายถึง อัตราส่วน AL/BA = 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ
- 4C และ 6C หมายถึง อุณหภูมิบ่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตัวอย่าง OS65L4C หมายถึง จีโอโพลเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม (ไม่ผ่านการเผาซ้ำ) ใช้หินปูนย่อยเป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสม อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.65 และอุณหภูมิบ่ม 40 องศาเซลเซียส



ตาราง 2 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร ของตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1

Mixed Code Name	BA Source	Replace bagasse ash with aluminum dust (%)	AL/BA	Curing temperature (°C)	BA (kg)	Aluminum dust (kg)	Sand (kg)	Coarse aggregates (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₄ (kg)
A0R60L6C	A	0.00	0.60	60	409.63	-	553.01	1228.90	122.40	122.40
A2R60L6C		0.20	0.60	60	408.82	0.82	553.01	1228.90	122.40	122.40
A4R60L6C		0.40	0.60	60	408.00	1.64	553.01	1228.90	122.40	122.40
A6R60L6C		0.60	0.60	60	407.18	2.46	553.01	1228.90	122.40	122.40
A8R60L6C		0.80	0.60	60	406.36	3.28	553.01	1228.90	122.40	122.40
A10R60L6C		1.00	0.60	60	405.54	4.10	553.01	1228.90	122.40	122.40
B0R60L6C		0.00	0.60	60	409.63	0.00	553.01	1228.90	122.40	122.40
B2R60L6C		0.20	0.60	60	408.82	0.82	553.01	1228.90	122.40	122.40
B4R60L6C		0.40	0.60	60	408.00	1.64	553.01	1228.90	122.40	122.40
B6R60L6C		0.60	0.60	60	407.18	2.46	553.01	1228.90	122.40	122.40
B8R60L6C	0.80	0.60	60	406.36	3.28	553.01	1228.90	122.40	122.40	
B10R60L6C	1.00	0.60	60	405.54	4.10	553.01	1228.90	122.40	122.40	
A4R50L6C	A or B	Max compressive strength	0.50	60	408.00	1.64	553.01	1228.90	102.41	102.41
A4R55L6C	A or B	Max compressive strength	0.55	60	408.00	1.64	553.01	1228.90	112.65	112.65
A4R60L6C	A or B	Max compressive strength	0.65	60	408.00	1.64	553.01	1228.90	133.13	133.13
A4R60L8C	A or B	Max compressive strength	0.60	80	408.00	1.64	553.01	1228.90	122.40	122.40
A4R60L10C	A or B	Max compressive strength	0.60	100	408.00	1.64	553.01	1228.90	122.40	122.40

ตาราง 3 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ของตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2

Mixed Code Name	Type BA	Type Coarse aggregates	Curing temperature (°C)	AL/BA	BA (kg)	ALW (kg)	Sand (kg)	Coarse aggregate (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)
OS65L4C	OBA	Lime stone	40	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
OS60L4C	OBA	Lime stone	40	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
OS55L4C	OBA	Lime stone	40	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98
OS65L6C	OBA	Lime stone	60	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
OS60L6C	OBA	Lime stone	60	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
OS55L6C	OBA	Lime stone	60	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98
OG65L4C	OBA	Gravel	40	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
OG60L4C	OBA	Gravel	40	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
OG55L4C	OBA	Gravel	40	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98
OG65L6C	OBA	Gravel	60	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
OG60L6C	OBA	Gravel	60	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
OG55L6C	OBA	Gravel	60	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98

ตาราง 3 (ต่อ) ส่วนผสมซีไอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ของตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2

Mixed Code Name	Type BA	Type Coarse aggregates	Curing temperature (°C)	AL/BA	BA (kg)	ALW (kg)	Sand (kg)	Coarse aggregate (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)
RS65L4C	RBA	Lime stone	40	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
RS60L4C	RBA	Lime stone	40	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
RS55L4C	RBA	Lime stone	40	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98
RS65L6C	RBA	Lime stone	60	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
RS60L6C	RBA	Lime stone	60	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
RS55L6C	RBA	Lime stone	60	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98
RG65L4C	RBA	Gravel	40	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
RG60L4C	RBA	Gravel	40	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
RG55L4C	RBA	Gravel	40	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98
RG65L6C	RBA	Gravel	60	4.5	408.00	1.64	550.80	1,201.75	133.53	133.53
RG60L6C	RBA	Gravel	60	5.0	408.00	1.64	550.80	1,224.00	122.40	122.40
RG55L6C	RBA	Gravel	60	5.5	408.00	1.64	550.80	1,242.83	112.98	112.98

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 ถ้ำชานอ้อย

ถ้ำชานอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล 2 แห่ง ได้แก่ ถ้ำชานอ้อยจากจังหวัดกาฬสินธุ์ (แหล่ง A) และถ้ำชานอ้อยจากจังหวัดมหาสารคาม (แหล่ง B) แสดงดังภาพประกอบ 10(ก) และ 10(ข) ตามลำดับ ถ้ำชานอ้อยทั้ง 2 แห่ง นำมาปรับปรุงโดยการบดเพื่อลดขนาด โดยบดให้มีความละเอียดข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ถ้ำชานอ้อยบดวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง แสดงให้เห็นขนาดและลักษณะรูปร่างที่มีเหลี่ยมมุมของถ้ำชานอ้อยจากแหล่ง A และ B แสดงในภาพประกอบ 11(ก) และ 11(ข) ตามลำดับ ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเบื้องต้นของถ้ำชานอ้อย จากแหล่ง A และ B แสดงดังตาราง 4

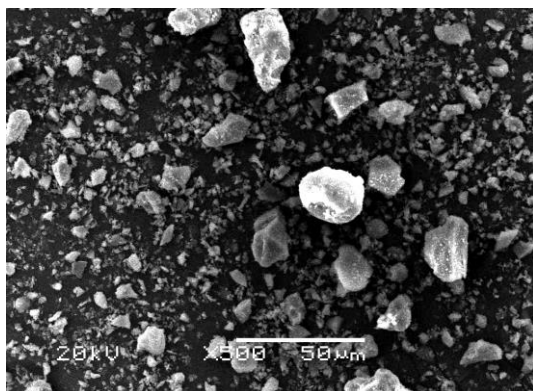


(ก)ถ้ำชานอ้อยแหล่ง A (ข)ถ้ำชานอ้อยแหล่ง B (ค)เศษชอลูมิเนียม

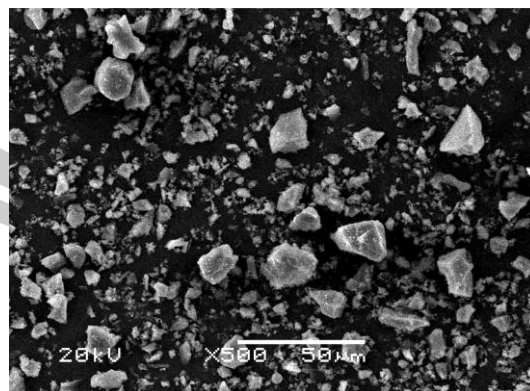
ภาพประกอบ 8 ถ้ำชานอ้อยแหล่ง A ถ้ำชานอ้อยแหล่ง B และเศษชอลูมิเนียม

ตาราง 4 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเบื้องต้นของถ้ำชานอ้อย แหล่ง A และ B และถ้ำชานอ้อยแหล่ง A ที่ผ่านการเผาซ้ำ (RBA)

Type - Source	Chemical composition						Specific gravity,		Absorption of BA after grinding	Loss on Ignition (%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	Before grinding	After grinding		
OBA-A	77.57	4.15	4.66	3.72	3.08	0.80	1.92	2.35	8.7	12.7
OBA-B	59.56	4.30	4.06	15.41	7.10	0.09	1.79	2.18	14.3	18.3
RBA-A	79.64	3.62	4.99	3.15	1.36	0.15	-	2.52	7.5	6.5



(ก) แหล่ง A



(ข) แหล่ง B

ภาพประกอบ 9 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง ของเก้าชานอ้อยบด (ก)แหล่ง A และ (ข)แหล่ง B

4.1.2 วัสดุผสมรวม

มวลรวมละเอียด ทดสอบค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) มาตรฐาน ASTM C136-95 และการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดมาตรฐาน ASTM C128 พบว่าทรายที่นำมาใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เฉลี่ยเท่ากับ 2.7 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.21 โดยน้ำหนัก

มวลรวมหยาบ ทดสอบการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ มาตรฐาน ASTM C117 พบว่าทรายที่นำมาใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ หินปูนย่อยและกรวด มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.77 และ 0.65 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.2 ผลการทดสอบตัวแปรศึกษา ส่วนที่ 1

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ศึกษาผลจากการใช้เก้าชานอ้อย 2 แหล่ง ได้แก่ แหล่ง A และ B เป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ศึกษาผลของการแทนที่เก้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ศึกษาผลของปริมาณสายละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยกำหนดอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 และศึกษาผลของอุณหภูมิบ่ม 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบแสดงดังตาราง 5

ตาราง 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1

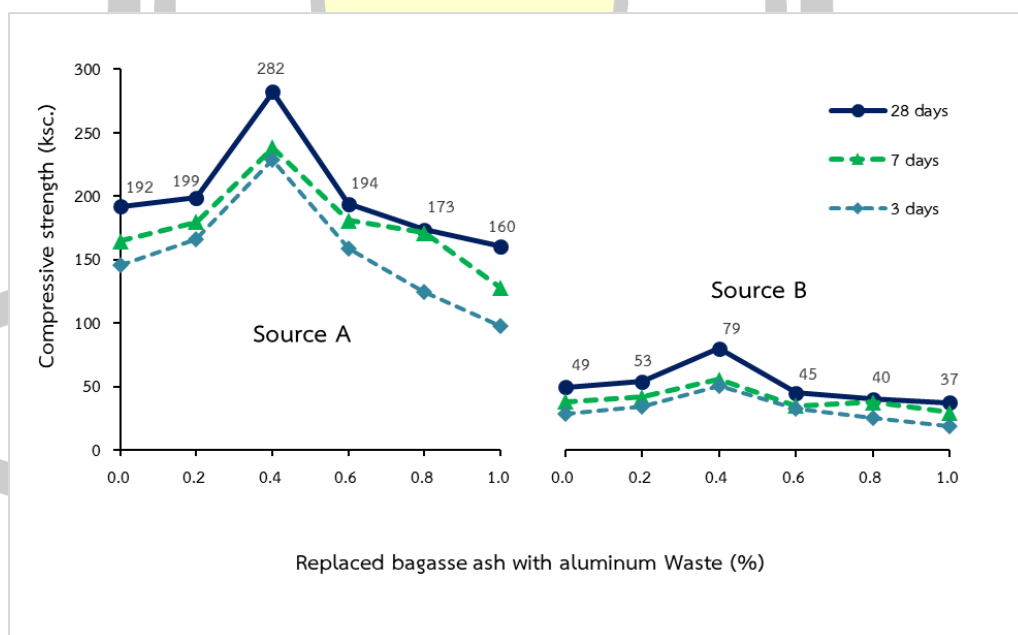
Mixed Code Name	Source BA	Replace bagasse ash with aluminum scrap (%)	AL/BA	Curing (°C)	Avg. Compressive strength		
					3 days (ksc)	7 days (ksc)	28 days (ksc)
A0R60L6C	A	0.0	0.60	60	146	164	192
A2R60L6C		0.2	0.60	60	166	180	199
A4R60L6C		0.4	0.60	60	229	238	282
A6R60L6C		0.6	0.60	60	158	181	194
A8R60L6C		0.8	0.60	60	124	171	173
A10R60L6C		1.0	0.60	60	98	128	160
B0R60L6C		B	0.0	0.60	60	28	38
B2R60L6C	0.2		0.60	60	34	41	53
B4R60L6C	0.4		0.60	60	50	55	79
B6R60L6C	0.6		0.60	60	32	35	45
B8R60L6C	0.8		0.60	60	25	37	40
B10R60L6C	1.0		0.60	60	19	29	37
A4R50L6C	A		0.4	0.50	60	272	297
A4R55L6C	A	0.4	0.55	60	240	262	293
A4R60L6C	A	0.4	0.65	60	158	168	190
A4R60L8C	A	0.4	0.60	80	268	279	292
A4R60L10C	A	0.4	0.60	100	285	295	303

4.2.1.1 แหล่งของเถ้าขาน้อย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากการใช้เถ้าขาน้อย 2 แหล่ง แสดงดังตาราง 6 และภาพประกอบ 10 เมื่อพิจารณาจากทั้ง 2 แหล่งที่มาของเถ้าขาน้อย พบว่าในอัตราส่วนผสมเดียวกันจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขาน้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขาน้อยแหล่ง B ค่อนข้างมาก จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4 ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขาน้อยทั้ง 2 แหล่ง ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) พบว่าองค์ประกอบของธาตุซิลิกา (SiO_2) ของเถ้าขาน้อยแหล่ง A มากกว่าแหล่ง B โดยมีธาตุซิลิกา ร้อยละ 77.55 และ 59.56 ตามลำดับ ปริมาณของซิลิกามีผลต่อปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีองค์ประกอบซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เกิดโครงสร้างจี

โพลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (จักรพันธ์ วงษ์พา, 2552) ปริมาณของซิลิกาของแหล่ง A ที่มากกว่าแหล่ง B จึงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยแหล่ง B

จากผลทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่าเถ้าชานอ้อยหลังผ่านการบดแหล่ง A มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าแหล่ง B คือ 2.35 และ 2.18 ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา โดยนำเถ้าชานอ้อยมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเถ้าชานอ้อยแหล่ง A มีค่าการสูญเสียมวลจากการเผาร้อยละ 12.7 ซึ่งน้อยกว่าเถ้าชานอ้อยจากแหล่ง B ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 18.3 ทั้งนี้การที่เถ้าชานอ้อยแหล่ง B ที่มีค่าการสูญเสียมวลจากการเผาค่อนข้างสูงนั้นหมายถึง เถ้าชานอ้อยมีปริมาณของคาร์บอนหรือกากชานอ้อยที่เผาไหม้ไม่หมดสูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเถ้าชานอ้อย การเหลือของคาร์บอนหรือกากชานอ้อยส่งผลต่อการดูดน้ำและปริมาณน้ำที่เหลือจริงในส่วนผสม (สุวิมล สัจจาณิษฐ์, 2546) ค่าการดูดน้ำของเถ้าชานอ้อยแหล่ง A และ B มีค่าร้อยละ 8.7 และ 14.3 ตามลำดับ เถ้าชานอ้อยที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงส่งผลต่อเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อยแหล่ง B ไม่แข็งแรงเท่าแหล่ง A และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน จากทุกส่วนผสม พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าแหล่ง B มากกว่า 3.5 เท่า



ภาพประกอบ 10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของแหล่งที่มาเถ้าชานอ้อย และผลของการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียม

ตาราง 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย 2 แหล่ง และผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียม

Mixed Code Name	Source bagasse ash	Replace bagasse ash with aluminum dust (%)	Slump (cm.)	Avg. Compressive strength /Normalized ksc./(%)		
				3 days	7 days	28 days
				A0R60L6C	0.0	5.5-8.5
A2R60L6C	0.2	5.0-7.5	166/(114)	180/(109)	199/(104)	
A4R60L6C	0.4	4.5-7.5	229/(157)	238/(145)	282/(147)	
A6R60L6C	0.6	4.5-7.0	158/(109)	181/(110)	194/(101)	
A8R60L6C	0.8	4.0-5.5	124/(85)	171/(104)	173/(90)	
A10R60L6C	1.0	2.5-3.5	98/(67)	128/(78)	160/(84)	
B0R60L6C	0.0	5.5-9.0	28/(100)	38/(100)	49/(100)	
B2R60L6C	0.2	5.0-8.5	34/(122)	41/(109)	53/(109)	
B4R60L6C	0.4	5.0-7.5	50/(178)	55/(145)	79/(162)	
B6R60L6C	0.6	4.5-7.5	32/(116)	35/(92)	45/(91)	
B8R60L6C	0.8	4.5-6.0	25/(91)	37/(98)	40/(81)	
B10R60L6C	1.0	3.0-4.0	19/(67)	29/(78)	37/(75)	

*Maximum compressive strength at 28 days of age is 282 ksc.

4.2.1.2 การแทนที่ด้วยเศษอลูมิเนียม

ผลของการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมพิจารณาจากตาราง 6 และภาพประกอบ 10 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน โดยเปลี่ยนแปลงการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียม ร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงให้เห็นว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยทั้ง 2 แหล่ง สามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีต มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าชานอ้อย ด้วยเศษอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนัก และกำลังรับแรงอัดต่ำลงเมื่อการ แทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 0.6 0.8 และ 1.0 และจากการทดลองพบว่า เมื่อการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมมากขึ้นจะทำให้ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมี ความสามารถในการทำงานได้ลดลง (ส่วนผสมคอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น) ดังนั้นการแทนที่เถ้า ชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.4 มีความเพียงพอ ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตมีค่าสูงที่สุด โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแหล่ง A แทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมที่ร้อยละ

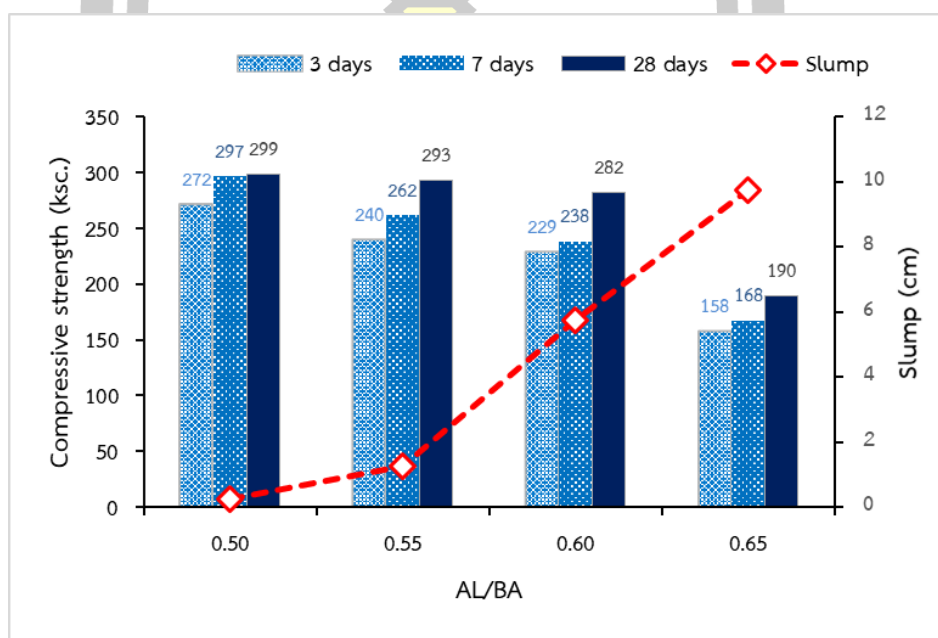
ละ 0.40 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 3 7 และ 28 วัน เท่ากับ 229 238 และ 282 กิโลกรัมต่อตารางที่เซนติเมตร ตามลำดับ มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยที่ไม่เติมอลูมิเนียมกว่าร้อยละ 145-157

4.2.1.3 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 แสดงดังตาราง 7 และภาพประกอบ 11 กำลังรับแรงอัดทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีต กำลังรับแรงอัดมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วน AL/BA โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อ AL/BA เท่ากับ 0.50 และมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อ AL/BA เพิ่มขึ้นเป็น 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ เช่นเดียวกับปริมาณน้ำในส่วนผสมซีเมนต์คอนกรีตทั่วไป (W/C) คือกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมลง (CPAC Concrete Academy, 2013) แต่ต้องไม่ลดลงเกินความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ หากจีโอโพลิเมอร์ลดปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไปเกินความต้องการก็จะทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ไม่แข็งแรง มีกำลังรับแรงอัดต่ำ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียมมีกำลังรับแรงอัดสูงเมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์มีค่าต่ำนั้นอาจเป็นผลดีในแง่การประหยัดต้นทุนในการผลิต แต่ก็ยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BA ต่ำ จะมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำเช่นกัน โดยจากการทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BL เท่ากับ 0.50 มีค่าการยุบตัว (Slump) เพียง 0-0.5 เซนติเมตร ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน AL/BL เท่ากับ 0.55 ค่าการยุบตัวประมาณ 0.5-2.0 ซม. ดังนั้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจึงควรมีกระบวนการช่วยในการทำให้แน่น และตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 และ 0.65 มีค่าการยุบตัวประมาณ 4.0-7.5 ซม. และ 7.5-12.0 ซม.ตามลำดับ เกณฑ์มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก มทข.101-53 กำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่เหมาะสม 5.0-15.0 ซม. ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นส่วนคอนกรีต ส่วนคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวต่ำอาจเหมาะสำหรับงานซ่อมแซมเฉพาะส่วนซึ่งไม่ต้องการการไหลหรือความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมากนัก

ตาราง 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น

Mixed Code Name	AL/BA	Slump (cm.)	Avg. Compressive strength/Normalized		
			ksc./(%)		
			3 days	7 days	28 days
A4R50L6C	0.50	0-0.5	272/(119)	297/(124)	299/(106)
A4R55L6C	0.55	0.5-2.0	240/(105)	262/(110)	293/(104)
A4R60L6C	0.60	4.0-7.5	229/(100)	238/(100)	282/(100)
A4R65L6C	0.65	7.5-12.0	158/(69)	168/(70)	190/(67)



ภาพประกอบ 11 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

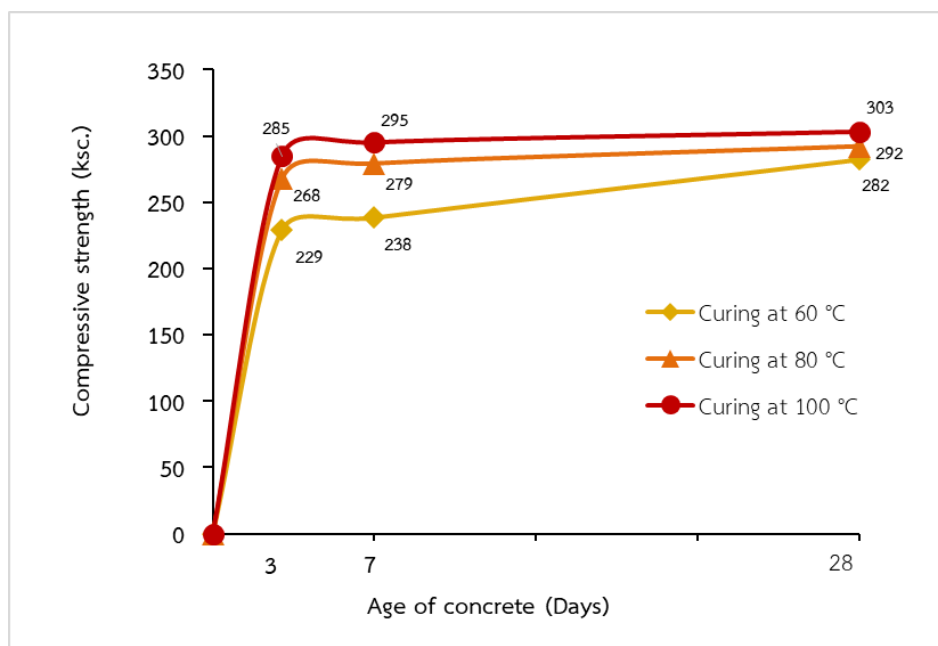
4.2.1.4 อุณหภูมิบ่ม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการบ่ม 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังตาราง 8 และภาพประกอบ 12 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ทุกส่วนผสมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีตและแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม หากพิจารณาในช่วงอายุต้น (อายุคอนกรีต 3 วัน) การบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิสูงสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ดีกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ (Bakharev, 2006; Dobrowolski, 2011) แต่เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นการพัฒนา กำลัง

รับแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิต่ำกว่าจะเริ่มพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิสูงมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ระหว่างคอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังรับแรงอัดจากการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยมีค่าประมาณร้อยละ 107 ของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาถึงกำลังรับแรงอัดในแต่ละอุณหภูมิ บ่มอย่างละเอียด ในภาพประกอบ 14 จากแผนภูมิเส้นแสดงแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีต เส้นแนวโน้มการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 100 และ 80 องศาเซลเซียส มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงตั้งแต่ในช่วงอายุต้น แต่ไม่ค่อยพัฒนาในช่วงอายุปลาย ส่วนจากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การพัฒนากำลังรับแรงอัดไม่สูงมากนักในช่วงอายุต้น แต่จะพัฒนามากขึ้นในช่วงอายุปลาย ความชันของเส้นกราฟช่วง อายุ 7-28 วัน มีความชันมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า เป็นผลดีต่อการนำไปพัฒนาเพื่อให้สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่สามารถแข็งตัวและให้กำลังรับแรงอัดได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูงในการบ่ม หากมีการนำไปศึกษาและพัฒนาต่อโดยการลดอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างลง ควรมีการพิจารณากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน อุณหภูมิบ่มสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ แต่อุณหภูมิบ่มที่สูงนี้ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในเนื้อคอนกรีต โดยคอนกรีตขยายตัวและเพิ่มปริมาตรที่บริเวณผิวที่สัมผัสกับความร้อนขณะทำการบ่ม การเหนียวรั้งของชิ้นส่วนคอนกรีตทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากแรงอัด และหลังการบ่มด้วยความร้อน อัตราการเกิดความร้อนลดลงถึงจุดที่อัตราการสูญเสียความร้อนสูงกว่าอัตราการเกิดการความร้อน นำไปสู่การหดตัวของคอนกรีตโดยที่การหดตัวจะทำให้เกิดความเค้นจากแรงดึงและทำให้เกิดการแตกร้าว (Dter, 2014) ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอุณหภูมิสูงไม่พัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุปลาย

ตาราง 8 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม

Mixed Code Name	Curing temperature (°C)	Avg. Compressive strength/Normalized ksc./(%)		
		3 days	7 days	28 days
		A4R60L6C	60	229/(100)
A4R60L8C	80	268/(117)	279/(117)	292/(104)
A4R60L10C	100	285/(124)	295/(124)	303/(107)



ภาพประกอบ 12 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

จากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1 พบว่า เถ้าชานอ้อยจากแหล่ง A แทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.40 ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ร้อยละ 145 ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มีผลต่อทั้งกำลังรับแรงอัดและยังส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต เมื่อปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ต่ำ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงแต่ความสามารถในการทำงานได้ลดลง ตรงกันข้ามเมื่อปริมาณสารละลายอัลคาไลน์สูงกำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำลง แต่ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์สามารถพัฒนาได้ดีในช่วงอายุต้นแต่พัฒนาได้ช้าหรือต่ำในช่วงอายุปลาย การบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในช่วงอายุต้น คอนกรีตมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย แต่ในช่วงอายุปลายคอนกรีตที่บ่มในอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ใกล้เคียงการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

4.3 ผลการทดสอบตัวแปรศึกษา ส่วนที่ 2

4.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบตัวอย่างส่วนที่ 1 พบว่าเถ้าชานอ้อยจากแหล่ง A แทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด ในส่วนนี้จึงนำเถ้าชานอ้อยจากแหล่ง A มาปรับปรุงโดยการเผาเถ้าชานอ้อยซ้ำก่อนนำมาเป็นวัสดุตั้งต้น

ศึกษาผลของการใช้เถ้าขานอ้อยดั้งเดิมและเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ศึกษาผลของชนิดของมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต โดยมวลรวมหยาบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อยและกรวด ศึกษาผลของการลดอุณหภูมิบ่มร้อนด้วยเตาอบ โดยอุณหภูมิในการบ่มคือ 40 และ 60 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าขานอ้อย (AL/BA) 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงปลาย ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังตาราง 9

ตาราง 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2

Mixed Code Name	Type BA	Coarse aggregates	Curing (°C)	AL/BA	Avg. Compressive strength				Slump (cm)
					3 days	7 days	28 days	90 days	
OS65L4C	OBA	Lime stone	40	0.65	104	132	197	271	5.00
OS60L4C	OBA	Lime stone	40	0.60	132	167	243	331	2.00
OS55L4C	OBA	Lime stone	40	0.55	132	182	290	365	0.50
OS65L6C	OBA	Lime stone	60	0.65	158	168	186	232	7.50
OS60L6C	OBA	Lime stone	60	0.60	182	218	243	299	2.50
OS55L6C	OBA	Lime stone	60	0.55	248	290	304	372	1.00
OG65L4C	OBA	Gravel	40	0.65	49	79	119	232	10.00
OG60L4C	OBA	Gravel	40	0.60	55	82	171	292	5.00
OG55L4C	OBA	Gravel	40	0.55	77	121	229	349	1.25
OG65L6C	OBA	Gravel	60	0.65	116	128	150	222	7.50
OG60L6C	OBA	Gravel	60	0.60	156	171	224	283	5.00
OG55L6C	OBA	Gravel	60	0.55	177	182	226	299	1.50
RS65L4C	RBA	Lime stone	40	0.65	92	145	218	353	7.50
RS60L4C	RBA	Lime stone	40	0.60	112	173	247	398	5.50
RS55L4C	RBA	Lime stone	40	0.55	165	200	323	458	1.00
RS65L6C	RBA	Lime stone	60	0.65	195	197	235	309	7.50
RS60L6C	RBA	Lime stone	60	0.60	247	257	296	402	5.50

ตาราง 9 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2

Mixed Code Name	Type BA	Coarse aggregates	Curing (°C)	AL/BA	Avg. Compressive strength				Slump (cm)
					3 days	7 days	28 days	90 days	
RS55L6C	RBA	Lime stone	60	0.55	290	313	342	439	1.25
RG65L4C	RBA	Gravel	40	0.65	43	71	152	276	12.00
RG60L4C	RBA	Gravel	40	0.60	72	87	192	300	7.50
RG55L4C	RBA	Gravel	40	0.55	95	134	244	353	2.00
RG65L6C	RBA	Gravel	60	0.65	114	133	185	293	12.50
RG60L6C	RBA	Gravel	60	0.60	133	146	226	336	6.00
RG55L6C	RBA	Gravel	60	0.55	138	162	231	376	2.00

4.3.1.1 ชนิดเถ้าขานอ้อย

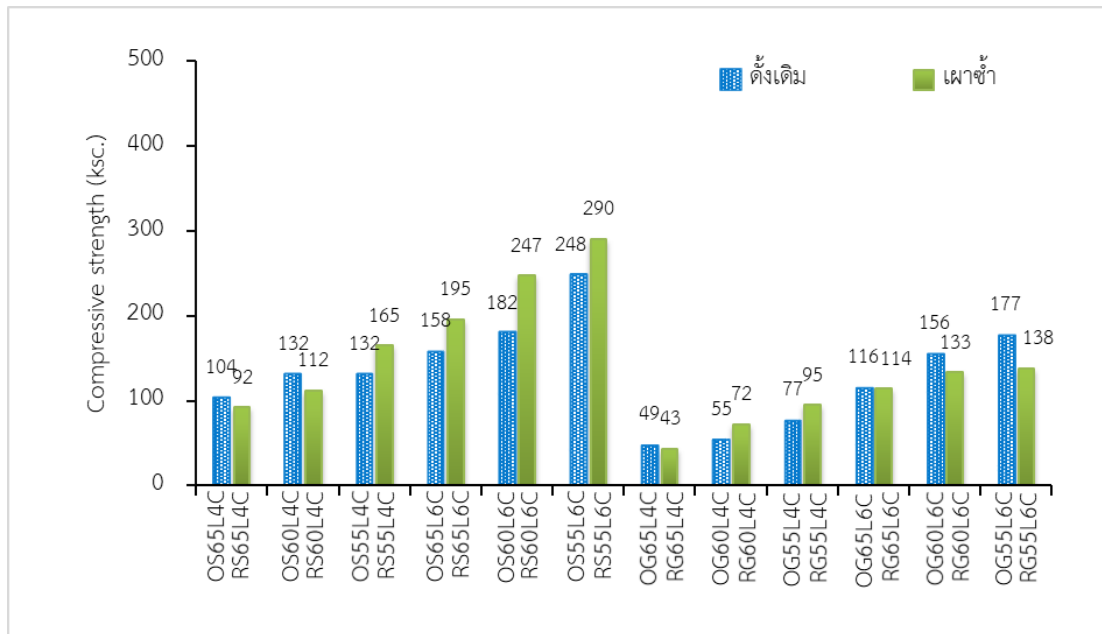
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบการใช้เถ้าขานอ้อยชนิดดั้งเดิมจากแหล่งและผ่านเผาซ้ำเป็นวัสดุตั้งต้นการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังตาราง 10 และภาพประกอบ 13 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสัดส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันเปลี่ยนแปลงการใช้เถ้าขานอ้อย 2 ชนิด คือ เถ้าขานอ้อยดั้งเดิมจากแหล่ง และเถ้าขานอ้อยผ่านการเผาซ้ำ พบว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยชนิดผ่านการเผาซ้ำมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยชนิดดั้งเดิม มีเพียงบางตัวอย่างในช่วงอายุต้น (อายุคอนกรีต 3-7 วัน) ที่กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยชนิดดั้งเดิมมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยชนิดผ่านการเผาซ้ำ แต่เมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าการใช้เถ้าขานอ้อยชนิดดั้งเดิม เนื่องจากการเผาซ้ำเถ้าขานอ้อยทำให้กากขานอ้อยเผาไหม้สมบูรณ์ส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอนในเถ้าขานอ้อยลดลง (คาวี มนทการติวงศ์, 2548) จากผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) พบว่าเถ้าขานอ้อยชนิดดั้งเดิมและเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ มีค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 12.7 และ 6.5 ตามลำดับ การเหลือของคาร์บอนหรือกากขานอ้อยก็จะส่งผลต่อการดูดน้ำและปริมาณน้ำที่เหลือจริงในส่วนผสม ค่าการดูดน้ำของเถ้าขานอ้อยชนิดดั้งเดิมและเผาซ้ำ มีค่าร้อยละ 8.7 และ 7.5 ตามลำดับ เถ้าขานอ้อยที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงส่งผลต่อเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยชนิดดั้งเดิม ไม่แข็งแรงเท่าเถ้าขานอ้อยเผาซ้ำ

ตาราง 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยชนิดดั้งเดิมจากแหล่งและผ่านเผาเข้าเป็นวัสดุตั้งต้น

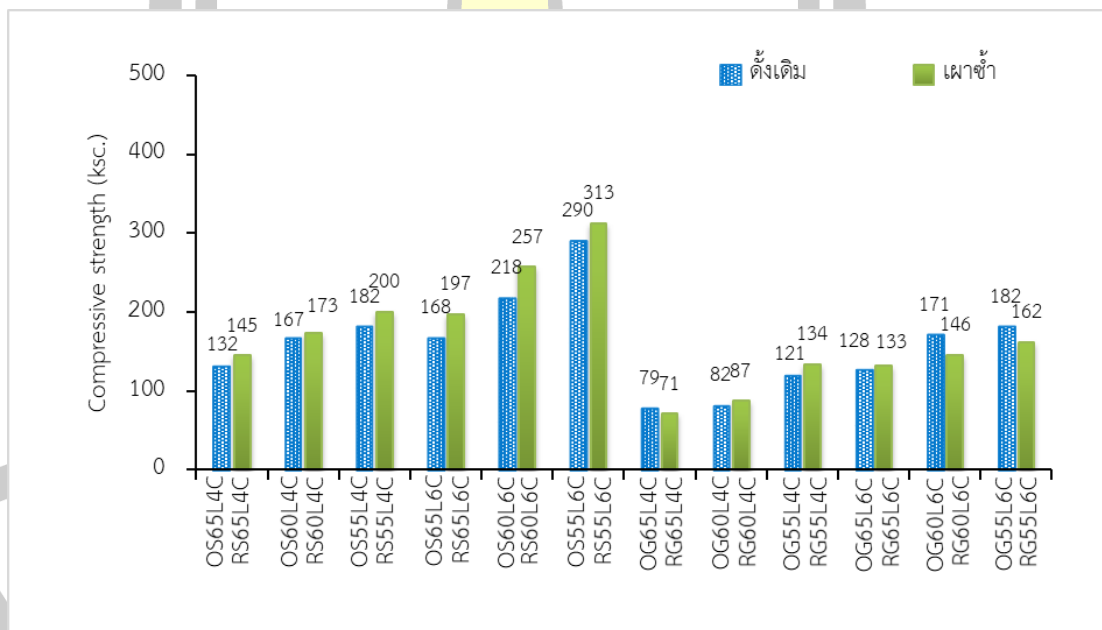
Mixed Code Name	avg. Compressive strength (ksc.)											
	3 days			7 days			28 days			90 days		
	OBA	RBA	Ratio	OBA	RBA	Ratio	OBA	RBA	Ratio	OBA	RBA	Ratio
_S65L4C	104	92	0.88	132	145	1.10	197	218	1.10	271	353	1.31
_S60L4C	132	112	0.85	167	173	1.04	243	247	1.02	331	398	1.20
_S55L4C	132	165	1.25	182	200	1.10	290	323	1.11	365	458	1.26
_S65L6C	158	195	1.24	168	197	1.17	186	235	1.27	232	309	1.33
_S60L6C	182	247	1.36	218	257	1.18	243	296	1.22	299	402	1.34
_S55L6C	248	290	1.17	290	313	1.08	304	342	1.12	372	439	1.18
_G65L4C	49	43	0.89	79	71	0.90	119	152	1.28	232	276	1.19
_G60L4C	55	72	1.30	82	87	1.07	171	192	1.12	292	300	1.03
_G55L4C	77	95	1.23	121	134	1.11	229	244	1.07	349	353	1.01
_G65L6C	116	114	0.98	128	133	1.04	150	185	1.23	222	293	1.32
_G60L6C	156	133	0.86	171	146	0.85	224	226	1.01	283	336	1.18
_G55L6C	177	138	0.78	182	162	0.89	226	231	1.02	299	376	1.26

หมายเหตุ : Mixed code name (_XXXXXX) หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตัวแปร ชนิดเถ้าชานอ้อย

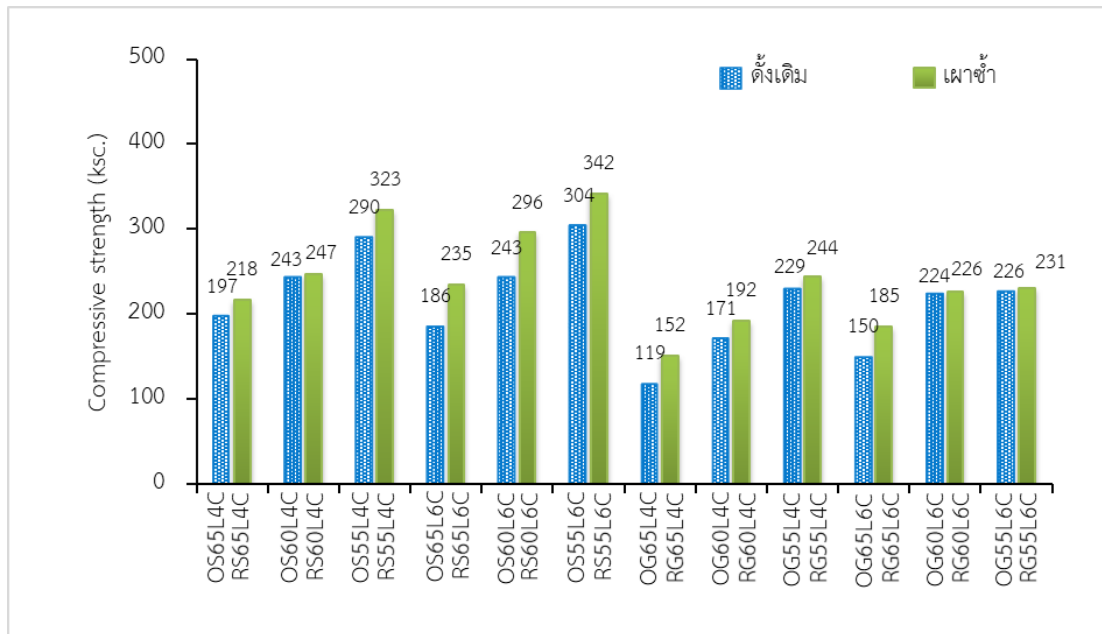
O = เถ้าชานอ้อยดั้งเดิม (OBA) , R = เถ้าชานอ้อยเผาเข้า (RBA)



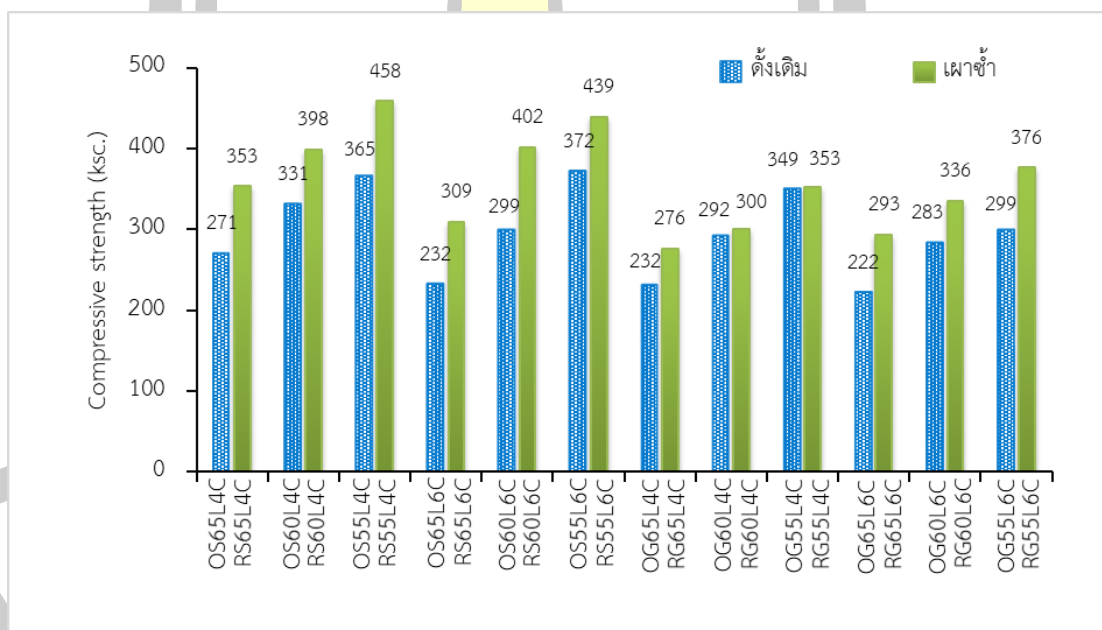
ภาพประกอบ 13(ก) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยตั้งเดิมและเผาซ้ำ



ภาพประกอบ 13(ข) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยตั้งเดิมและเผาซ้ำ



ภาพประกอบ 13(ค) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน
จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยตั้งเดิมและเผาซ้ำ



ภาพประกอบ 13(ง) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน
จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยตั้งเดิมและเผาซ้ำ

ภาพประกอบ 13 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยชนิดตั้งเดิมและเผาซ้ำ

4.3.1.2 ชนิดมวลรวมหยาบ

จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมมวลรวมหยาบแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อยและกรวด ลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด แสดงดังภาพประกอบ 14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบการใช้มวลรวมหยาบ 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนหยาบและกรวด พิจารณาจากภาพประกอบ 15 พบว่าที่ทุกอายุการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยในส่วนผสม มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้กรวดในส่วนผสม พิจารณาจากตาราง 11 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยในส่วน มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้กรวดในส่วนผสม ประมาณ 1.17-2.39 เท่า ที่อายุ 7 วัน สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้กรวดในส่วนผสม ประมาณ 1.27-2.05 เท่า ที่อายุ 28 วัน สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้กรวดในส่วนผสม ประมาณ 1.08-1.66 เท่า ที่อายุ 90 วัน สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้กรวดในส่วนผสม ประมาณ 1.04-1.33 เท่า ในส่วนนี้เกิดจากกรวดซึ่งมีพื้นผิวสัมผัสแบบผิวเรียบ ลื่น และกลมมน การเคลือบและยึดเหนี่ยวอนุภาคมวลรวมหยาบของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับกรวดไม่แข็งแรง เมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนย่อยที่มีพื้นผิวสัมผัสหยาบและมีเหลี่ยมมุม จีโอโพลิเมอร์เพสต์สามารถเคลือบและยึดเกาะได้อย่างแข็งแรงจะส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดดีขึ้น ลักษณะการยึดเกาะเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมหยาบหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด แสดงดังภาพประกอบ 14 จะเห็นว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีหินปูนย่อยในส่วนผสม คอนกรีตเกิดการวิบัติผ่านเนื้อหินปูนย่อยแสดงถึงการยึดเกาะระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมหยาบมีความแข็งแรงมาก ส่วนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกรวดในส่วนผสมคอนกรีตเกิดการวิบัติแบบแยกส่วนระหว่างเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมหยาบเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมหยาบชนิดกรวดนั้นไม่แข็งแรงมากพอ



(ก) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมด้วยหินปูนย่อย (ข) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมด้วยกรวด

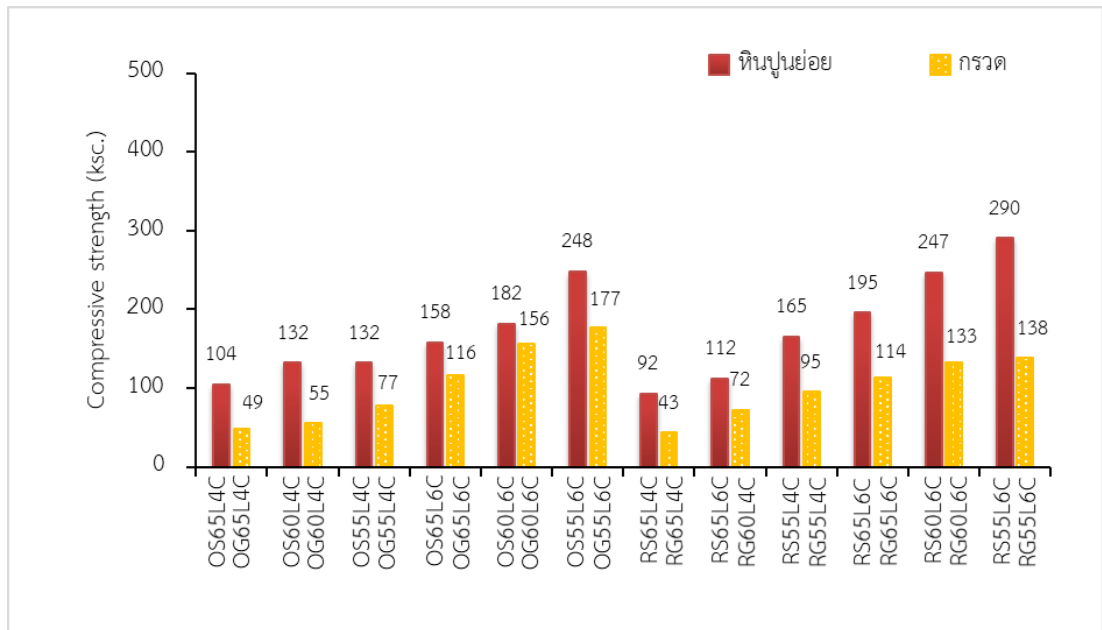
ภาพประกอบ 14 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่วิบัติหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตาราง 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและกรวดในส่วนผสม

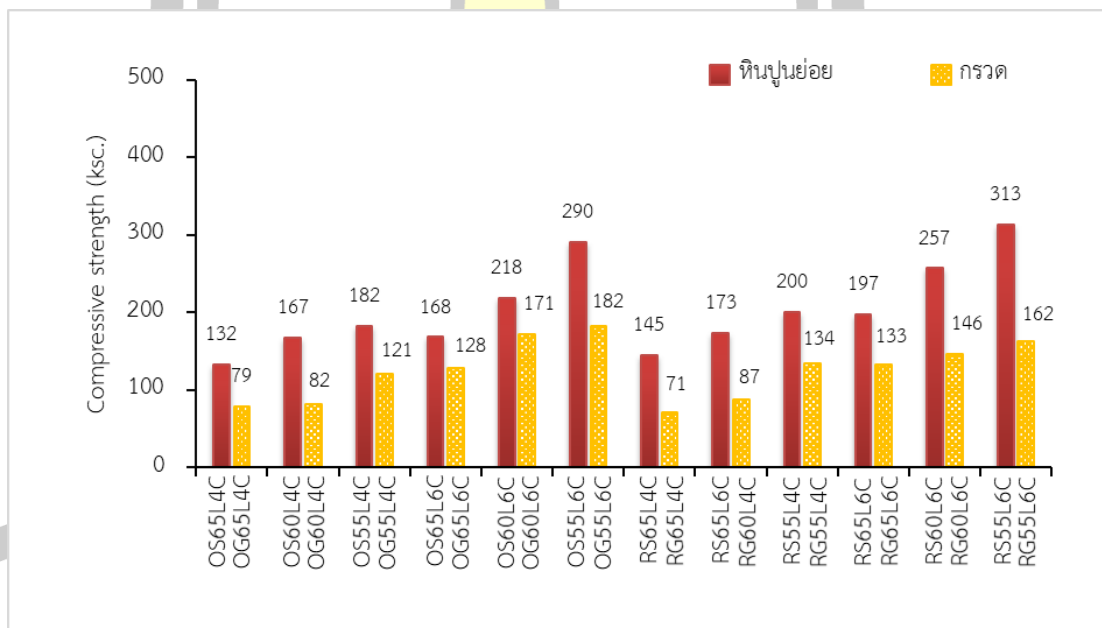
Mixed Code Name	avg. compressive strength (ksc.)											
	3 days			7 days			28 days			90 days		
	Lime stone (a)	Gravel (b)	Ratio (a/b)	Lime stone (a)	Gravel (b)	Ratio (a/b)	Lime stone (a)	Gravel (b)	Ratio (a/b)	Lime stone (a)	Gravel (b)	Ratio (a/b)
O_65L4C	104	49	2.15	132	79	1.68	197	119	1.66	271	232	1.17
O_60L4C	132	55	2.39	167	82	2.04	243	171	1.42	331	292	1.13
O_55L4C	132	77	1.70	182	121	1.51	290	229	1.27	365	349	1.04
O_65L6C	158	116	1.36	168	128	1.31	186	150	1.24	232	222	1.04
O_60L6C	182	156	1.17	218	171	1.27	243	224	1.08	299	283	1.06
O_55L6C	248	177	1.40	290	182	1.60	304	226	1.34	372	299	1.24
R_65L4C	92	43	2.13	145	71	2.05	218	152	1.43	353	276	1.28
R_60L4C	112	72	1.56	173	87	1.98	247	192	1.29	398	300	1.33
R_55L4C	165	95	1.74	200	134	1.50	323	244	1.32	458	353	1.30
R_65L6C	195	114	1.72	197	133	1.49	235	185	1.27	309	293	1.05
R_60L6C	247	133	1.85	257	146	1.76	296	226	1.31	402	336	1.20
R_55L6C	290	138	2.10	313	162	1.93	342	231	1.48	439	376	1.17

หมายเหตุ : Mixed code name (X_XXXXXX) หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตัวแปร ชนิดมวลรวมทราย

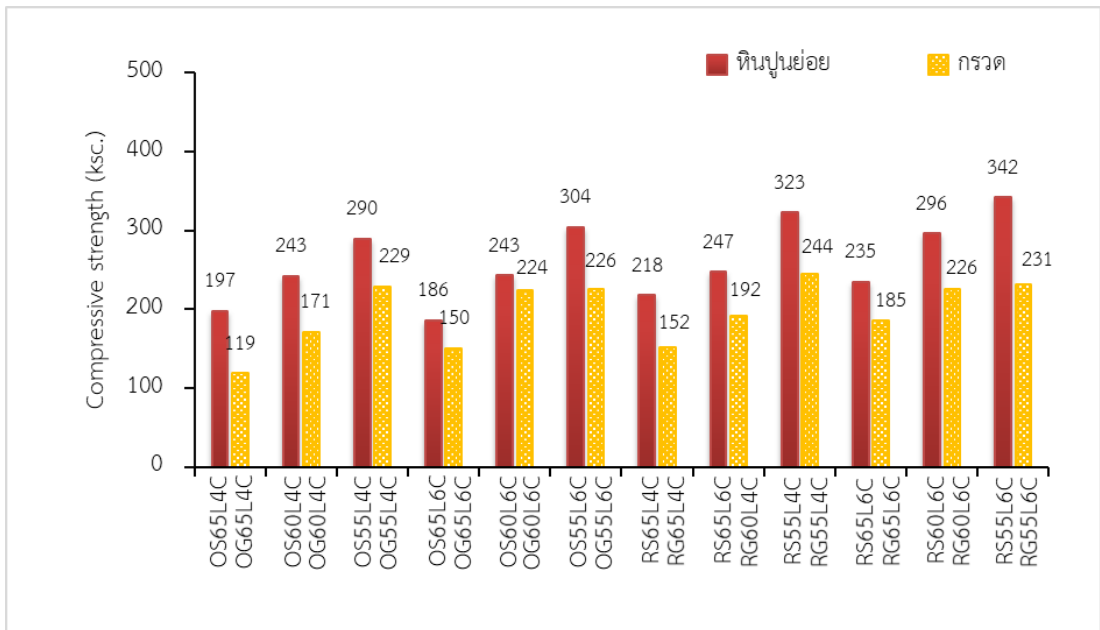
S = หินปูนย่อย (Lime stone) , G = กรวด (Gravel)



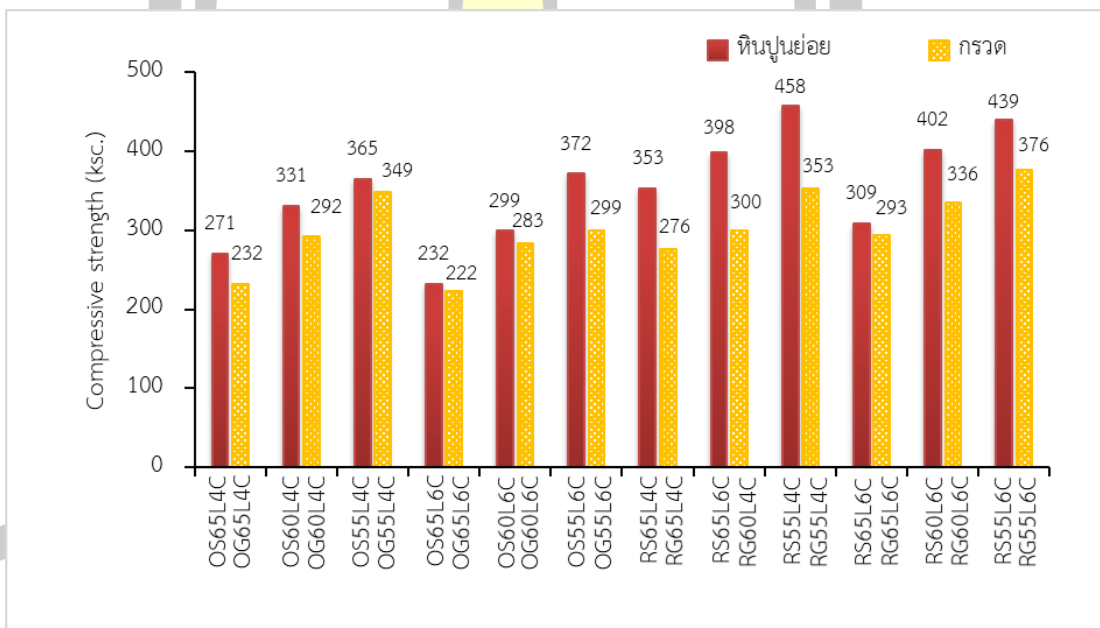
ภาพประกอบ 15 (ก) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากหินปูนย่อยและกรวด



ภาพประกอบ 15 (ข) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากหินปูนย่อยและกรวด



ภาพประกอบ15 (ค) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากหินปูนย่อยและกรวด



ภาพประกอบ15 (ง) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากหินปูนย่อยและกรวด

ภาพประกอบ 15 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
เปลี่ยนแปลงมวลรวมหยาบชนิดหินปูนย่อยและกรวด

4.3.1.3 อุณหภูมิบ่ม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบการบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ 40 และ 60 องศาเซลเซียส พิจารณาจากตาราง 12 และ ภาพประกอบ 16 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอายุทดสอบ 3 และ 7 วัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ที่อายุคอนกรีต 28 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาช่วงอายุคอนกรีตในระยะยาว ที่อายุคอนกรีต 90 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่าถึงสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ต่อมีค่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน มีค่าประมาณ 0.89-1.46 เท่า

อุณหภูมิบ่มสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน มีผลต่อการพัฒนาการบ่มกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ แต่อุณหภูมิบ่มที่สูงนี้ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในเนื้อคอนกรีต โดยคอนกรีตขยายตัวและเพิ่มปริมาตรที่บริเวณผิวที่สัมผัสกับความร้อนขณะทำการบ่ม การเหนียวรั้งของชิ้นส่วนคอนกรีตทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากแรงอัด และหลังการบ่มด้วยความร้อน อัตราการเกิดความร้อนลดลงถึงจุดที่อัตราการสูญเสียความร้อนสูงกว่าอัตราการเกิดการความร้อน นำไปสู่การหดตัวของคอนกรีตโดยที่การหดตัวจะทำให้เกิดความเค้นจากแรงดึงและทำให้เกิดการแตกร้าว ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอุณหภูมิสูงหยุดพัฒนาการบ่มกำลังรับแรงอัดหรือพัฒนาการบ่มกำลังรับแรงอัดได้ช้าในช่วงอายุปลาย การบ่มที่อุณหภูมิต่ำลงมากระบวนการของการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มที่นานเพื่อที่จะพัฒนาการบ่มกำลังรับแรงอัดให้ดีขึ้น

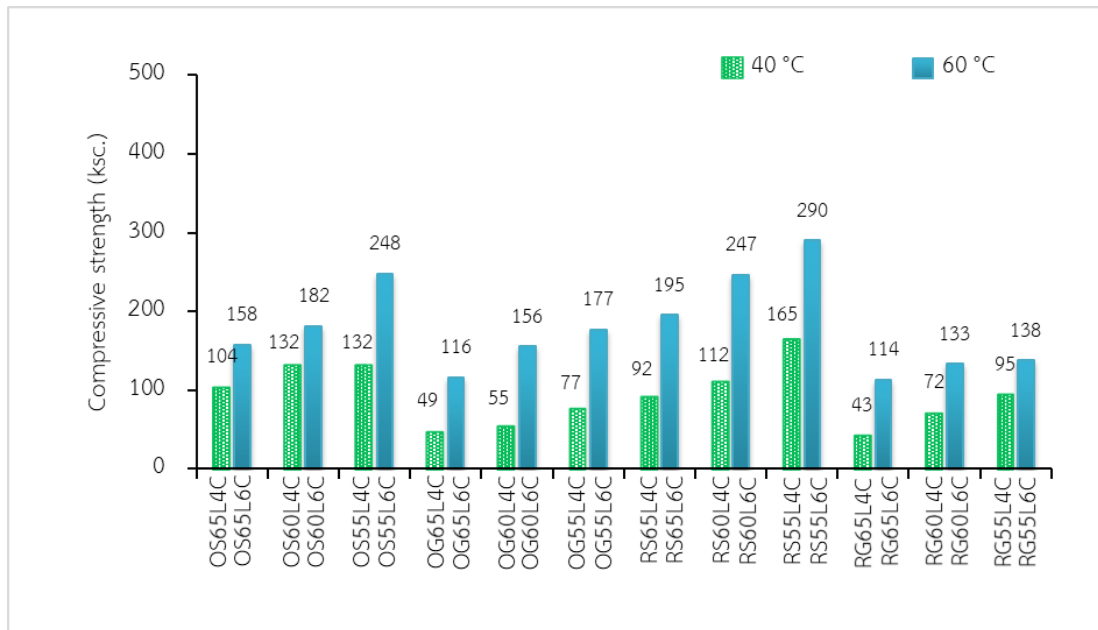
จากผลการทดสอบข้างต้นเป็นแง่ดีในด้านความประหยัดพลังงานในการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต การศึกษาพัฒนาให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถพัฒนาการบ่มกำลังรับแรงอัดได้ในอุณหภูมิบ่มที่ต่ำลงหรือสามารถพัฒนาการบ่มกำลังรับแรงอัดได้ในสภาพอากาศปกติเป็นปัญหาที่น่าสนใจในการศึกษาและพัฒนาต่อเพื่อให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถนำไปใช้งานได้จริงในชีวิตประจำวัน

ตาราง 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มร้อน 40 และ 60 องศาเซลเซียส

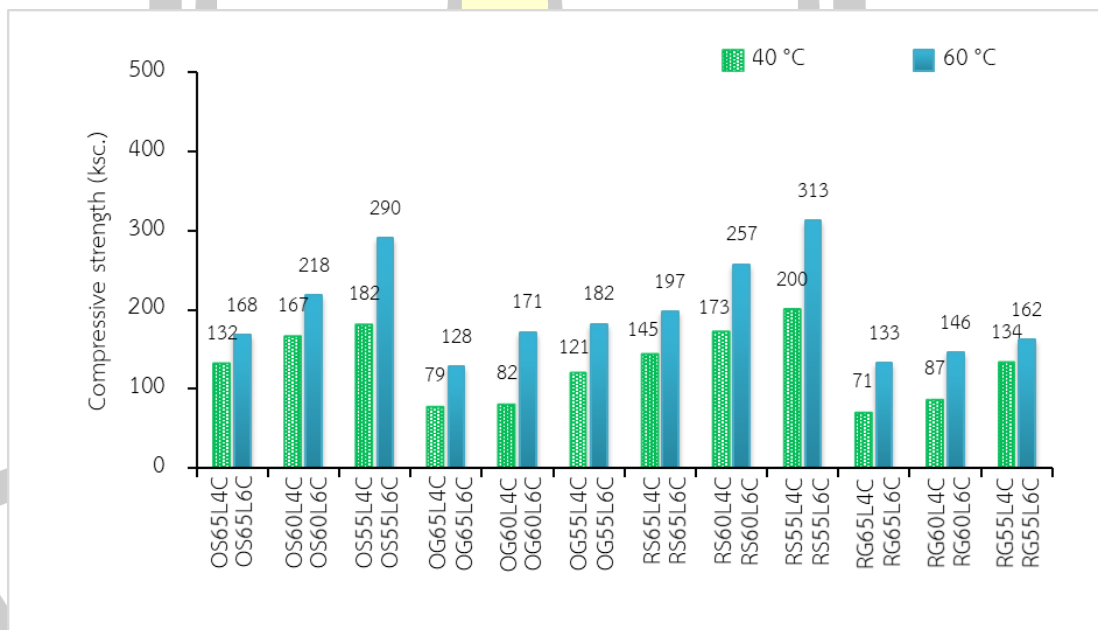
Mixed Code Name	avg. compressive strength (ksc.)											
	3 days			7 days			28 days			90 days		
	40 °C	60 °C	Ratio	40 °C	60 °C	Ratio	40 °C	60 °C	Ratio	40 °C	60 °C	Ratio
OS65L_	104	158	(a/b)	132	168	(a/b)	197	186	(a/b)	271	186	(a/b)
OS60L_	132	182	0.66	167	218	0.73	243	243	1.00	331	243	1.36
OS55L_	132	248	0.53	182	290	0.63	290	304	0.95	365	304	1.20
OG65L_	49	116	0.42	79	128	0.62	119	150	0.79	232	222	1.04
OG60L_	55	156	0.35	82	171	0.48	171	224	0.77	292	283	1.03
OG55L_	77	177	0.44	121	182	0.66	229	226	1.01	349	299	1.17
RS65L_	92	195	0.47	145	197	0.74	218	235	0.93	353	309	1.14
RS60L_	112	247	0.45	173	257	0.67	247	296	0.84	398	402	0.99
RS55L_	165	290	0.57	200	313	0.64	323	342	0.94	458	439	1.04
RG65L_	43	114	0.38	71	133	0.53	152	185	0.82	276	293	0.94
RG60L_	72	133	0.54	87	146	0.60	192	226	0.85	300	336	0.89
RG55L_	95	138	0.69	134	162	0.83	244	231	1.06	353	376	0.94

หมายเหตุ : Mixed code name (XXXXX_) หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตัวแปร อุณหภูมิบ่ม

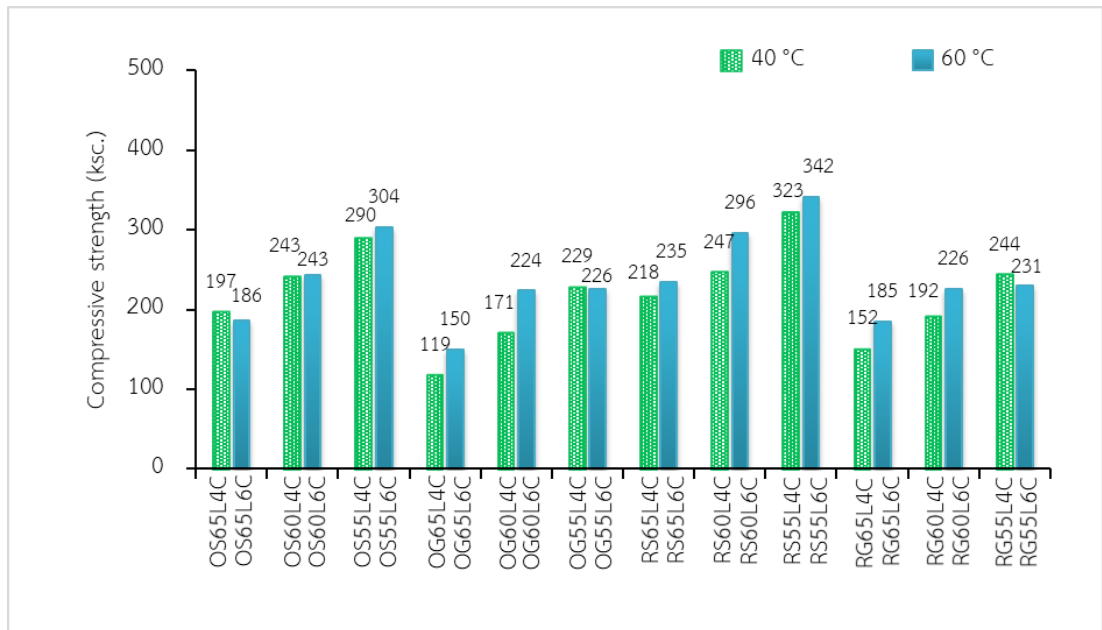
4C = บ่ม 40 องศาเซลเซียส , 6C = บ่ม 60 องศาเซลเซียส



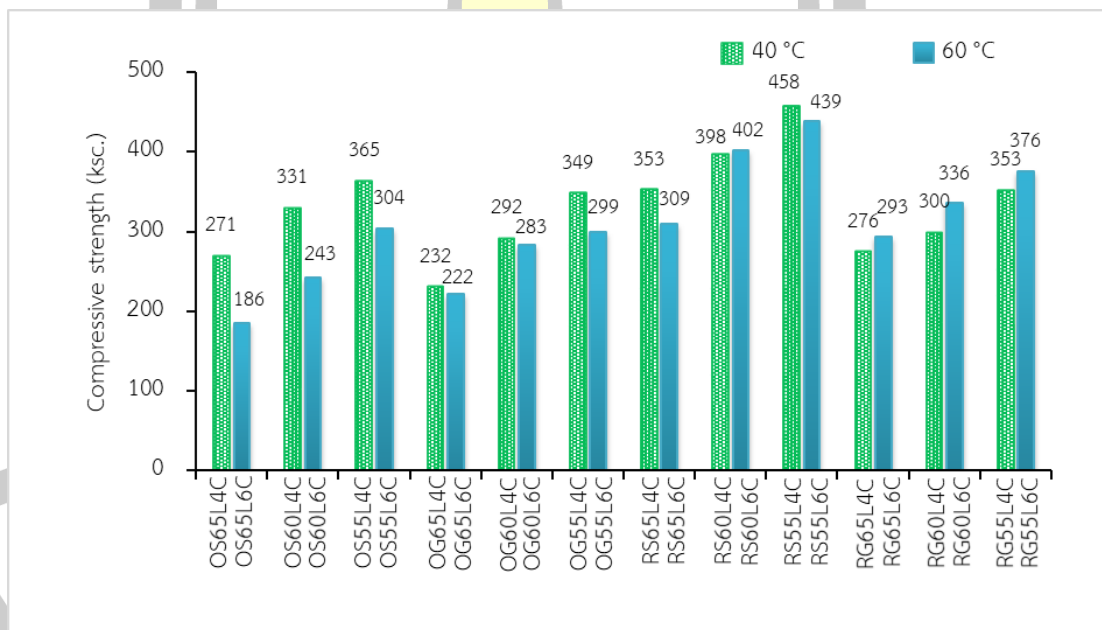
ภาพประกอบ16(ก) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากอนุหภูมิบ่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ16(ข) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากอนุหภูมิบ่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส



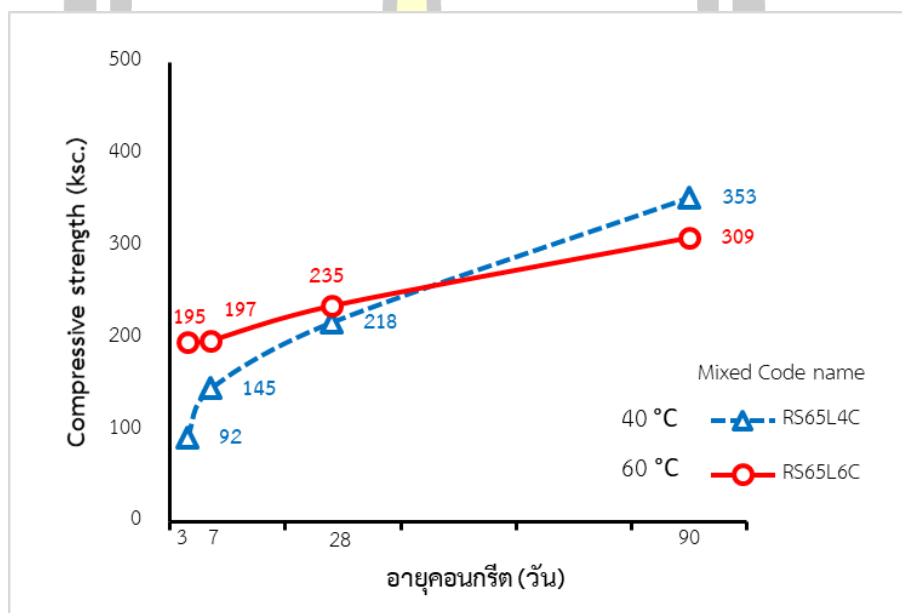
ภาพประกอบ 16(ค) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากอุณหภูมิมั่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 16(ง) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากอุณหภูมิมั่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส

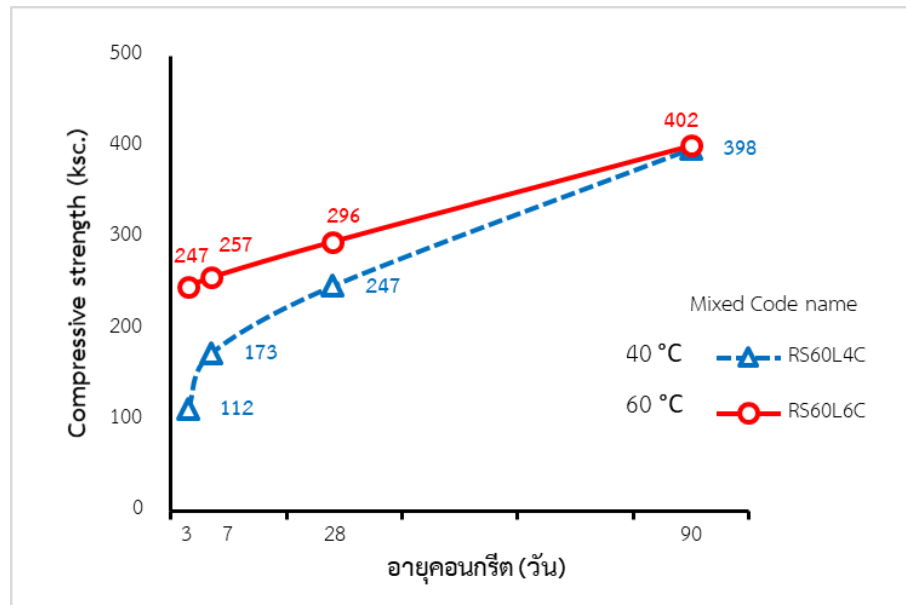
ภาพประกอบ 16 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมั่ม
 40 และ 60 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่ออายุคอนกรีต แสดงดังภาพประกอบ 17 พบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในช่วงอายุต้น (3-7 วัน) การพัฒนากำลังรับแรงอัดยังเป็นไปได้ช้าเมื่อเทียบกับการบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่ออายุทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 90 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

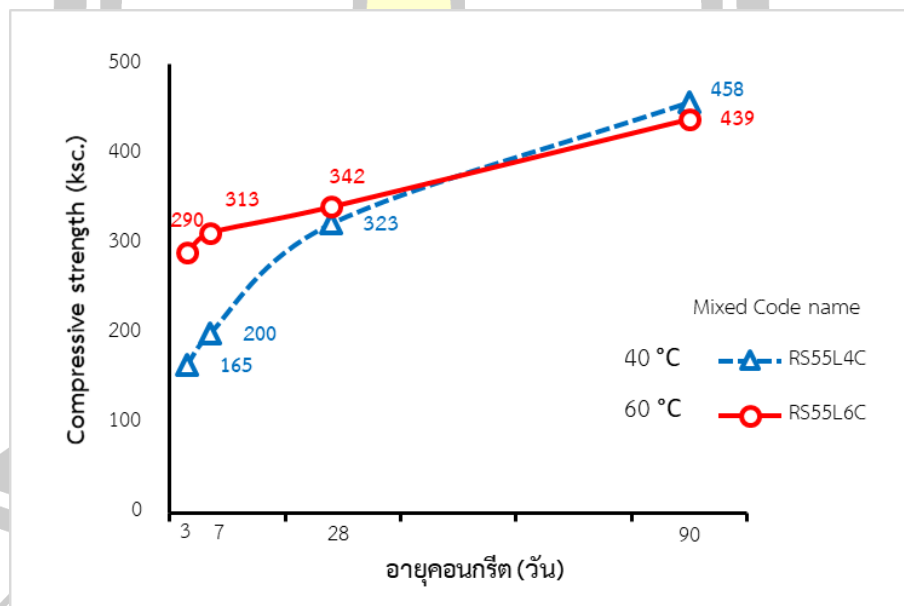


ภาพประกอบ 17(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม RS65L4C (40 องศาเซลเซียส) และ RS65L6C (60 องศาเซลเซียส)

พหุ ประ โภ ชัย



ภาพประกอบ 17(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม RS60L4C (40 องศาเซลเซียส) และ RS60L6C (60 องศาเซลเซียส)



ภาพประกอบ 17(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม RS55L4C (40 องศาเซลเซียส) และ RS55L6C (60 องศาเซลเซียส)

ภาพประกอบ 17 เส้นแนวโน้มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีต
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส

4.3.1.4 ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์

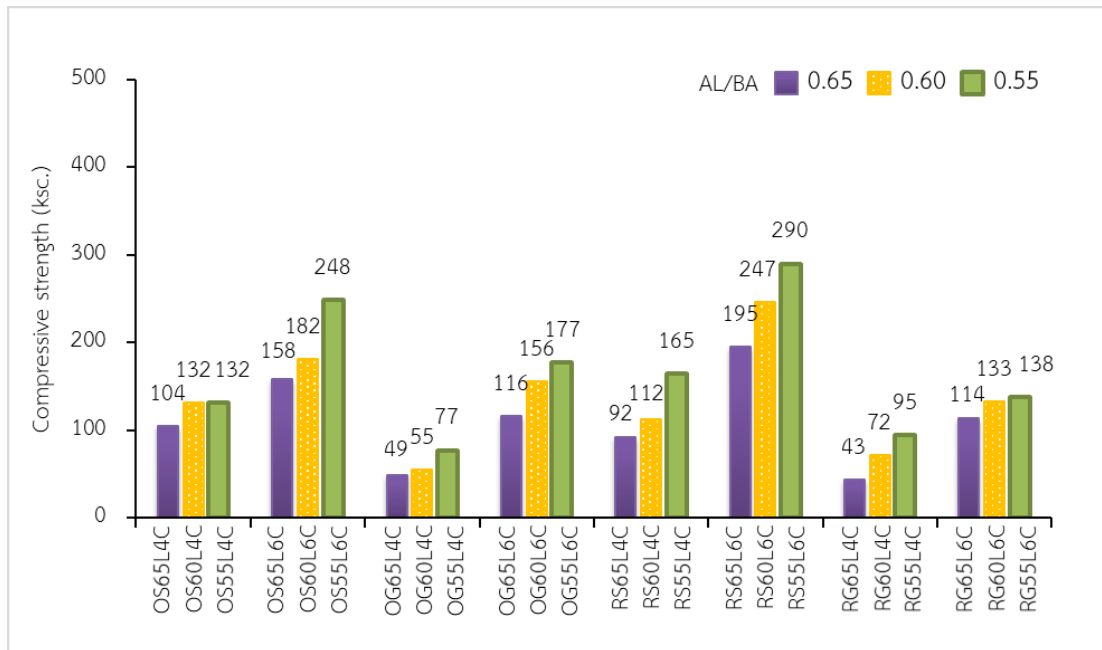
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 แสดงดังตาราง 13 และภาพประกอบ 18 พบว่ากำลังรับแรงอัดทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีต กำลังรับแรงอัดมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วน AL/BA เช่นเดียวกันกับการทดสอบตัวแปรทดสอบส่วนที่ 1 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อ AL/BA เท่ากับ 0.55 และมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อ AL/BA เพิ่มขึ้นเป็น 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ เช่นเดียวกับปริมาณน้ำในส่วนผสมซีเมนต์คอนกรีตทั่วไป (W/C) คือ กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม หากจีโอโพลิเมอร์ลดปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไปเกินความต้องการก็จะทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันไม่สมบูรณ์ ความหนืดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับวัสดุมวลรวมไม่แข็งแรง ส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดต่ำ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BA ต่ำ จะมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำด้วยเช่นกัน โดยจากการทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BL เท่ากับ 0.55 ค่าการยุบตัวประมาณ 0.5-2.0 ซม. ดังนั้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ต่ำจึงควรมีกระบวนการช่วยในการทำให้แน่น และตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 และ 0.65 มีค่าการยุบตัวประมาณ 2.5-7.5 ซม. และ 7.5-12.5 ซม. ตามลำดับ พิจารณาภาพประกอบ 18(ง) เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 1 2 และ 3 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเดียวกัน เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 365 331 และ 271 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่ออัตราส่วน AL/BA เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่ำลง เช่นเดียวกัน ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 4 5 และ 6 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเดียวกัน เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 372 299 และ 232 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 7 8 และ 9 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเดียวกัน เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 349 292 และ 232 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เป็นต้น

ตาราง 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.65 0.60 และ 0.50

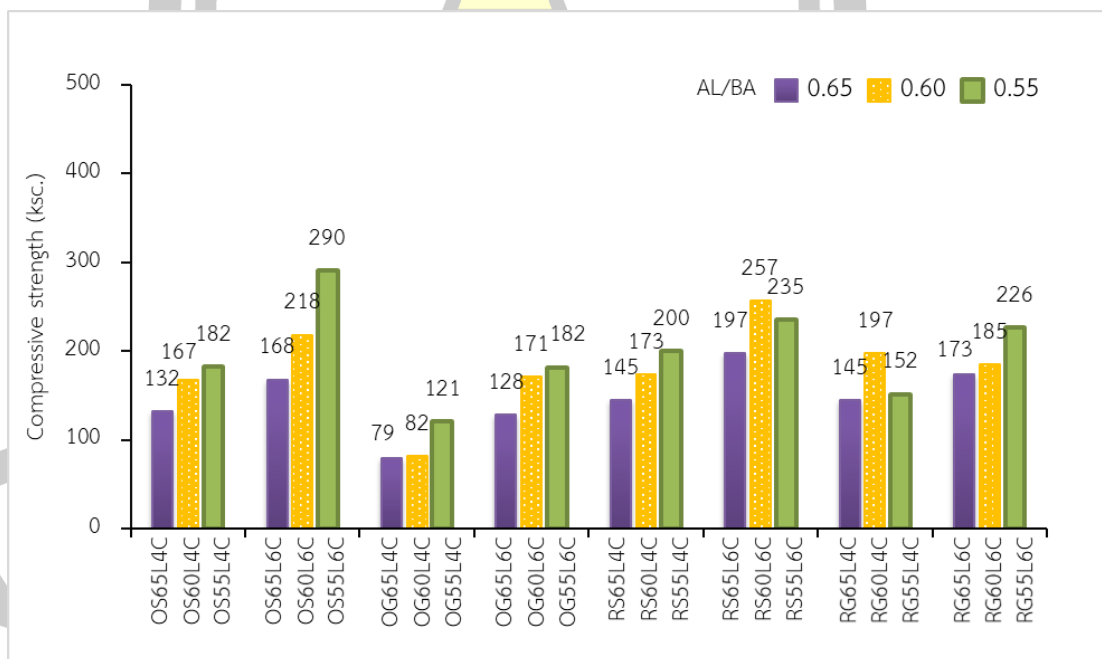
Code Name	avg. compressive strength (ksc.)												Slump (cm)
	3 days			7 days			28 days			90 days			
	0.65	0.60	0.55	0.65	0.60	0.55	0.65	0.60	0.55	0.65	0.60	0.55	
OS__4C	104	132	132	132	167	182	197	243	290	271	331	365	
OS__6C	158	182	248	168	218	290	186	243	304	232	299	372	
OG__4C	49	55	77	79	82	121	119	171	229	232	292	349	
OG__6C	116	156	177	128	171	182	150	224	226	222	283	299	
RS__4C	92	112	165	145	173	200	218	247	323	353	398	458	
RS__6C	195	247	290	197	257	235	235	296	342	309	402	439	
RG__4C	43	72	95	145	197	152	152	192	244	276	300	353	
RG__6C	114	133	138	173	185	226	185	226	231	293	336	376	
										0.5-2.0	2.5-7.5	5.0-12.5	

หมายเหตุ : Mixed code name (XX__XX) หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตัวแปร อัตราส่วน AL/BA

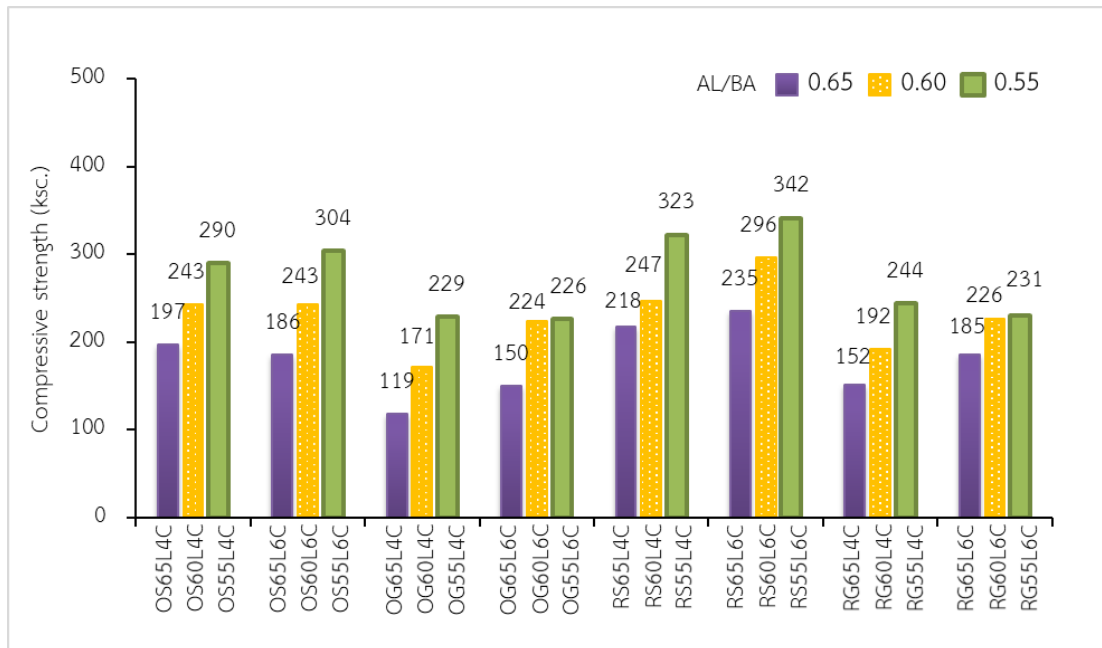
65L = อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.65 , 60L = อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 , 55L = อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.55



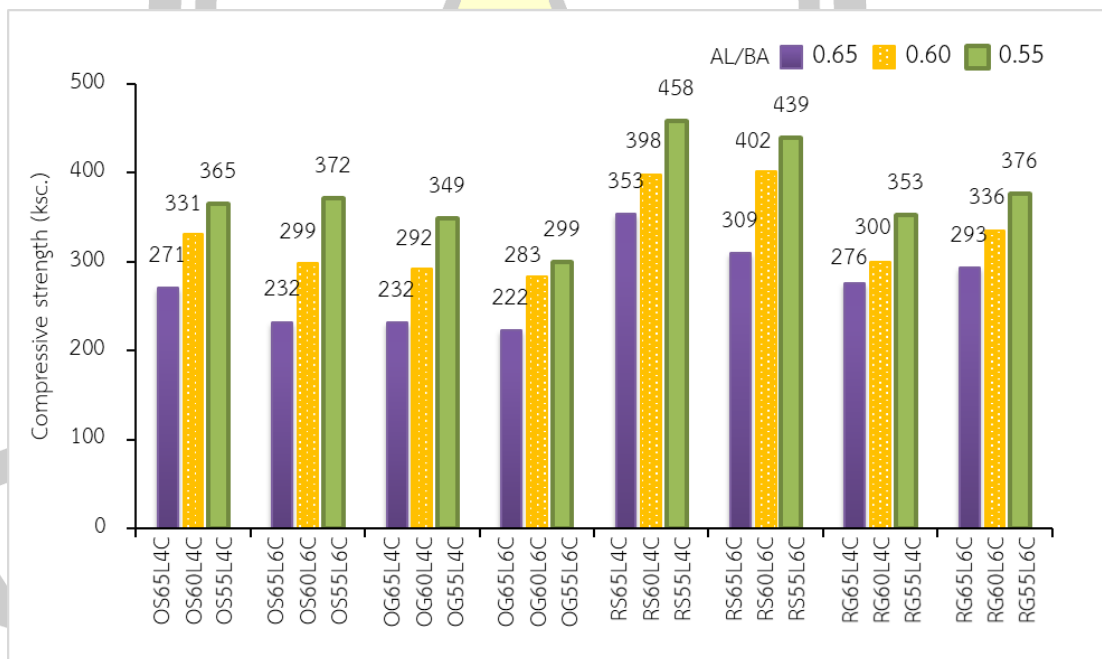
ภาพประกอบ18 (ก) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65



ภาพประกอบ18(ข) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65



ภาพประกอบ18(ค) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65



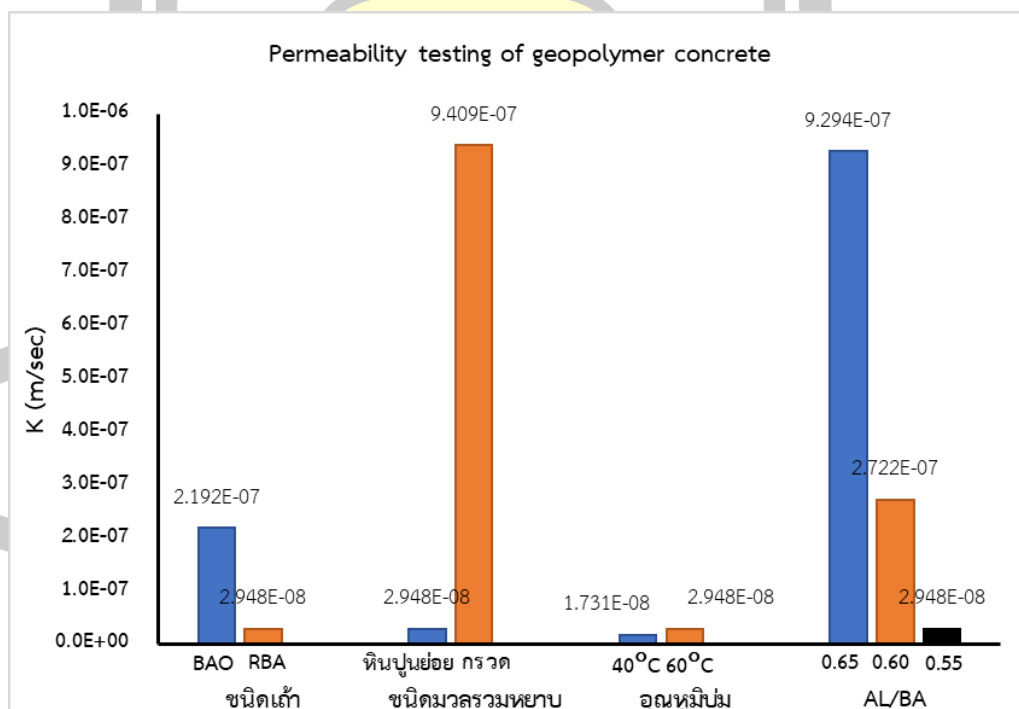
ภาพประกอบ18(ง) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน
 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65

ภาพประกอบ 18 แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลง AL/BA
 เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65

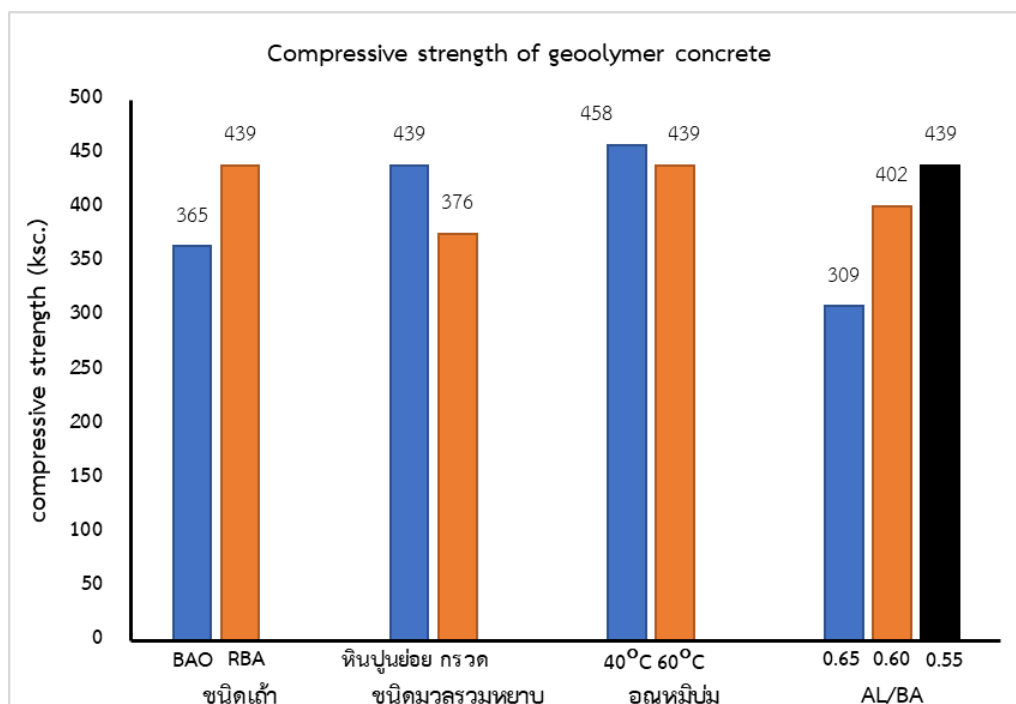
4.3.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

จากการทดสอบตัวอย่างโดยใช้แก้วชานอ้อยจากแหล่ง A แทนที่แก้วชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.40 ศึกษาผลของการใช้แก้วชานอ้อยดั้งเดิมจากแหล่งและแก้วชานอ้อยที่ผ่านการเผาซึ่งที่ ผลของชนิดของมวลรวมหยาบ โดยมวลรวมหยาบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อยและกรวด ผลของอุณหภูมิในการบ่ม 40 และ 60 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วชานอ้อย 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก ทดสอบหาค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ผลการทดสอบ แสดงดังตาราง 14 ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (K) กับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต คือคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำมีกำลังรับแรงอัดสูง ตรงกันข้ามเมื่อคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำ

จากภาพประกอบ 19(ก) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของชนิดแก้วชานอ้อยที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพบว่าแก้วชานอ้อยเผา (RBA) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าแก้วชานอ้อยดั้งเดิม (OBA) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากแก้วชานอ้อยชนิดดั้งเดิมและเผา ซึ่ง มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ เท่ากับ 2.192×10^{-7} และ 2.948×10^{-8} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ



ภาพประกอบ 19(ก) แผนภูมิแท่งแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพประกอบ 19(ข) แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ภาพประกอบ 19 แผนภูมิแท่งแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงชนิดเก้าขานอ้อย ชนิดมวลรวมหยาบ อุณหภูมิบ่ม และปริมาณสารอัลคาไลน์

เปรียบเทียบผลจากชนิดมวลรวมหยาบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากหินปูนย่อยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากกรวดค่อนข้างมาก ส่วนนี้เกิดจากผิวของกรวดมีลักษณะค่อนข้างเรียบและลื่น เกิดช่องว่างช่วงรอยต่อระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับกรวด ตรงข้ามกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับหินปูนย่อยที่มีผิวสัมผัสหยาบและมีเหลี่ยมมุมเกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ส่งผลต่อทั้งความแข็งแรงและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากหินปูนย่อยและกรวด มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ เท่ากับ 2.948×10^{-08} และ 9.409×10^{-07} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากหินปูนย่อยและกรวด เตรียมสำหรับทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังภาพประกอบ 20

อุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำแตกต่างกันไม่มากนัก โดยการบ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ เท่ากับ 1.731×10^{-8} และ 2.948×10^{-08} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสม โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 พบว่าจีโอโพลิ

เมอร์คอนกรีตที่มี AL/BA เท่ากับ 0.55 หรือมีปริมาณของสารละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสมน้อยที่สุด ส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดสูงและมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณสารละลายอัลคาไลน์สูงกว่า ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 มีค่าเท่ากับ 2.948×10^{-8} 2.722×10^{-7} และ 9.294×10^{-7} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ประมาณ 1×10^{-12} เมตรต่อวินาที (คอนกรีตเทคโนโลยี, 2543) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีการบ่มร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกร้าวนเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในเนื้อคอนกรีต โดยคอนกรีตขยายตัวและเพิ่มปริมาตรที่บริเวณผิวที่สัมผัสกับความร้อนขณะทำการบ่ม การเนื้ยวรั้งของชิ้นส่วนคอนกรีตทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากแรงอัด หลังการบ่มด้วยความร้อน อัตราการเกิดความร้อนลดลงถึงจุดที่อัตราการสูญเสียความร้อนมากกว่าอัตราการเกิดการความร้อน นำไปสู่การหดตัวของคอนกรีตทำให้เกิดความเค้นจากแรงดึงและทำให้เกิดการแตกร้าวนในเนื้อคอนกรีต



(ก) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยเป็นส่วนผสม

(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กรวดเป็นส่วนผสม

ภาพประกอบ 20 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้หินปูนย่อยและกรวดเป็นส่วนผสม

พหุ ปรณ ทิโต ชีเว

ตาราง 14 ผลการทดสอบอัตราส่วนผสมน้ำของซีเมนต์โพลิเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2

Mixed Code Name	Bagasse ash	Coarse aggregate	Curing temperature °C	AL/BA	avr.Kf (m/sec)	Avg. Compressive strength @ 90 days (ksc.)
OS55L6C	BAO	Lime Stone	60	0.55	2.192E-07	365
RS55L4C	RBA	Lime Stone	40	0.55	1.731E-08	458
RS65L6C	RBA	Lime Stone	60	0.65	9.294E-07	309
RS60L6C	RBA	Lime Stone	60	0.60	2.722E-07	402
RS55L6C	RBA	Lime Stone	60	0.55	2.948E-08	439
RG55L6C	RBA	Gravel	60	0.55	9.409E-07	376

4.3.3 ผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน

จากการทดสอบตัวอย่างโดยใช้เก้าชานอ้อยจากแหล่ง A แทนที่เก้าชานอ้อยด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.40 ศึกษาผลของการใช้เก้าชานอ้อยดั้งเดิมจากแหล่งและเก้าชานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำที่ ผลของชนิดของมวลรวมหยาบ 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อยและกรวด ผลของอุณหภูมิในการบ่มร้อนด้วยเตาอบ 40 และ 60 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของปริมาณสารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วนสารละลายต่อเก้าชานอ้อย 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ ผลการทดสอบ แสดงดังตาราง 15 และภาพประกอบ 21

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของชนิดเก้าชานอ้อยที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพบว่าเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ (RBA) และเก้าชานอ้อยดั้งเดิม (OBA) มีค่าการสึกกร่อนใกล้เคียงกัน โดยจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเก้าชานอ้อยเผาซ้ำ(RBA) มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าและมีค่าการสึกกร่อนน้อยกว่าเก้าชานอ้อยดั้งเดิม (OBA) ซึ่งมีค่าการสึกกร่อนเท่ากับ 7.02 และ 7.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ

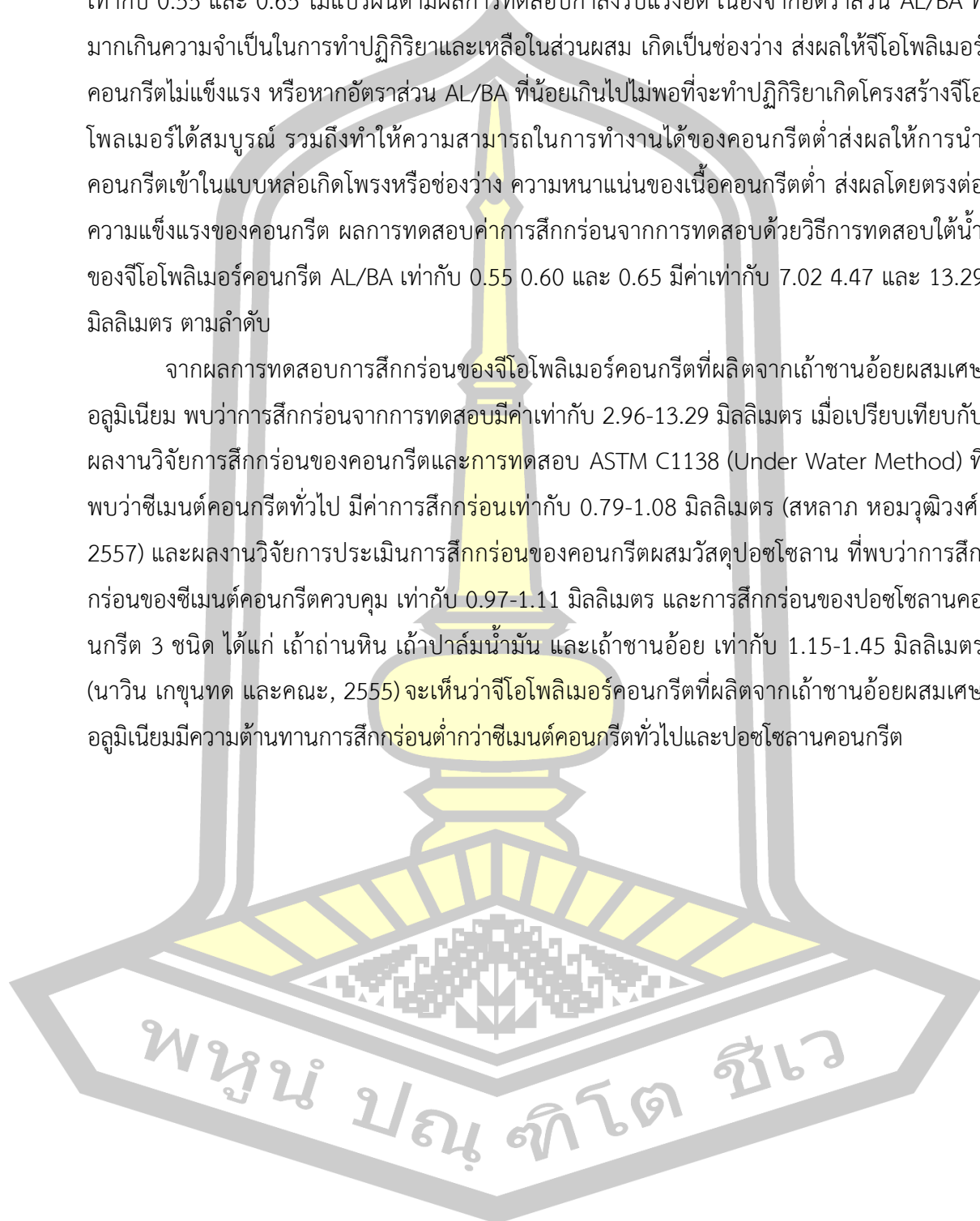
เปรียบเทียบผลจากชนิดมวลรวมหยาบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีหินปูนย่อยในส่วนผสมมีค่าการสึกกร่อนมากกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกรวดในส่วนผสม ในส่วนนี้เกิดจากการทดสอบในช่วงแรกผิวสัมผัสของลูกเหล็กจะเสียดสีกับเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จากนั้นลูกเหล็กเริ่มสัมผัสและเสียดสีกับมวลรวมหยาบ ซึ่งผิวของกรวดมีลักษณะโค้งมน ค่อนข้างเรียบ และลื่น ลดการเสียดสีระหว่างลูกเหล็กและกรวด เกิดการสึกกร่อนน้อย ตรงข้ามกับหินปูนย่อยที่มีผิวสัมผัสหยาบและมีเหลี่ยมมุมเกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ส่งผลให้เกิดการเสียดสีและสึกกร่อนมากกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมจากหินปูนย่อยและกรวด มีค่าการสึกกร่อนจากวิธีการทดสอบใต้น้ำ เท่ากับ 7.02 และ 2.95 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ที่ผลิตจากเก้าชานอ้อยและมีส่วนผสมมวลรวมหยาบเป็นหินปูนย่อยและกรวด ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ แสดงดังภาพประกอบ 22

อุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 40 มีค่าการสึกกร่อนน้อยกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่านั้นจะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันในช่วงอายุต้นได้ดี แต่อาจทำให้เกิดรอยร้าวภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต พิจารณาจากกำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ดังภาพประกอบ 21(ข) อุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและค่าการสึกกร่อนจากการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตบ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าการสึกกร่อน เท่ากับ 4.54 และ 7.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสม โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 พบว่าจีโอโพลิ

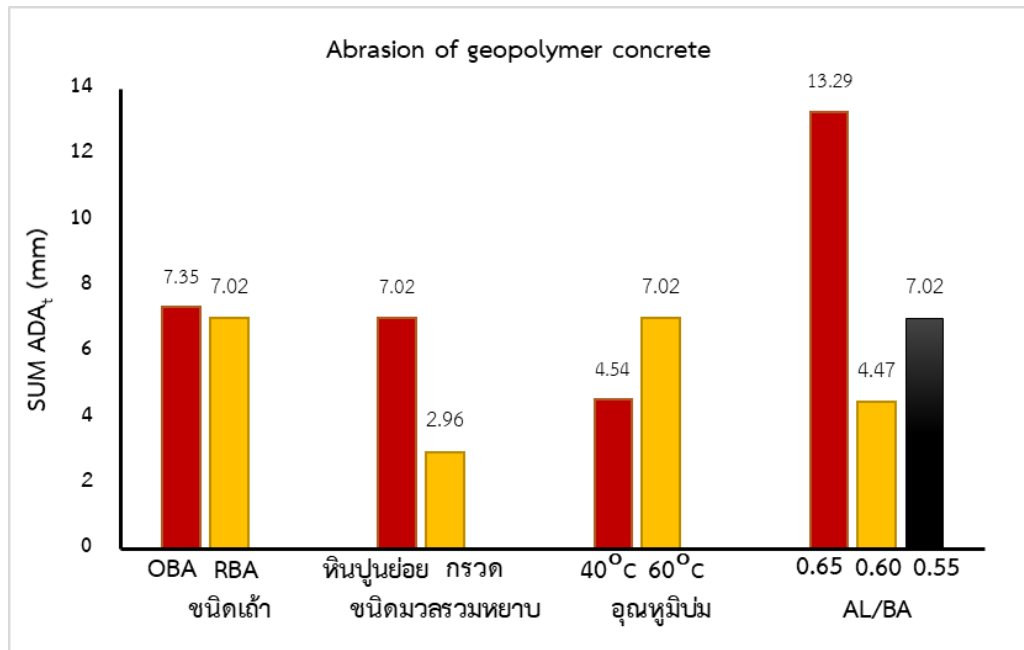
เมอร์คอนกรีตที่มี AL/BA เท่ากับ 0.60 มีค่าการสึกกร่อนน้อยกว่า จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มี AL/BA เท่ากับ 0.55 และ 0.65 ไม่แปรผันตามผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด เนื่องจากอัตราส่วน AL/BA ที่มากเกินไปเกินความจำเป็นในการทำปฏิกิริยาและเหลือในส่วนผสม เกิดเป็นช่องว่าง ส่งผลให้จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตไม่แข็งแรง หรือหากอัตราส่วน AL/BA ที่น้อยเกินไปไม่พอที่จะทำปฏิกิริยาเกิดโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์ได้สมบูรณ์ รวมถึงทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตต่ำส่งผลให้การนำคอนกรีตเข้าไปในแบบหล่อเกิดโพรงหรือช่องว่าง ความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตต่ำ ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของคอนกรีต ผลการทดสอบค่าการสึกกร่อนจากการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบได้น้ำของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต AL/BA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 มีค่าเท่ากับ 7.02 4.47 และ 13.29 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากผลการทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียม พบว่าการสึกกร่อนจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 2.96-13.29 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยการสึกกร่อนของคอนกรีตและการทดสอบ ASTM C1138 (Under Water Method) ที่พบว่าซีเมนต์คอนกรีตทั่วไป มีค่าการสึกกร่อนเท่ากับ 0.79-1.08 มิลลิเมตร (สหลาก หอมวุฒิวงศ์, 2557) และผลงานวิจัยการประเมินการสึกกร่อนของคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน ที่พบว่าการสึกกร่อนของซีเมนต์คอนกรีตควบคุม เท่ากับ 0.97-1.11 มิลลิเมตร และการสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าขานอ้อย เท่ากับ 1.15-1.45 มิลลิเมตร (นาวิน เกขุนทด และคณะ, 2555) จะเห็นว่าจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียมมีความต้านทานการสึกกร่อนต่ำกว่าซีเมนต์คอนกรีตทั่วไปและปอซโซลานคอนกรีต

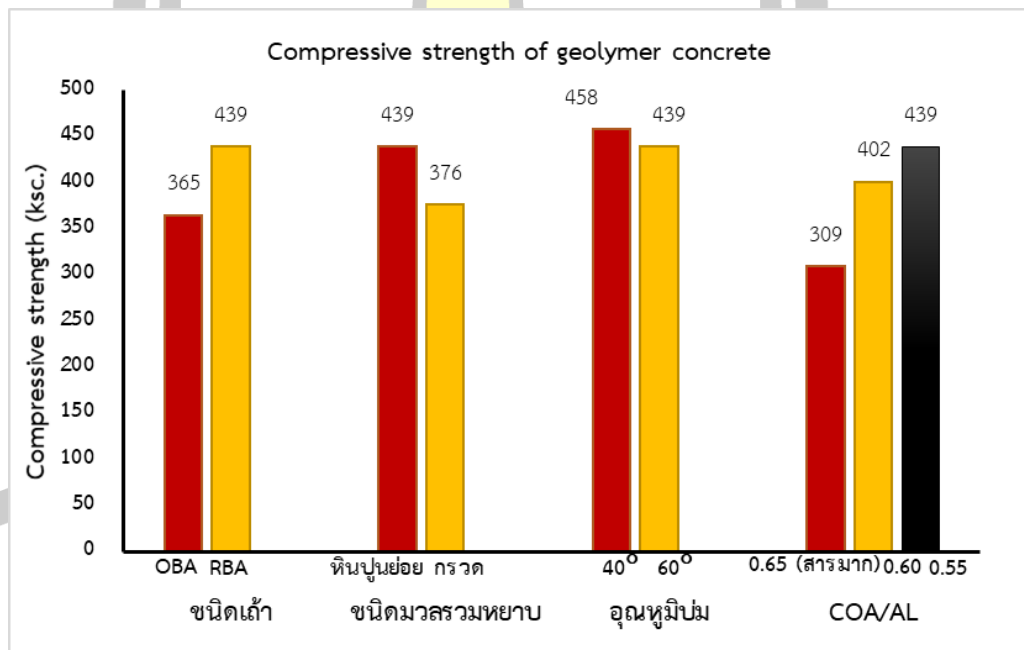


ตาราง 15 ผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำของจีไอโพลีเมอร์คอนกรีตจากตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2

Mixed Code Name	Bagasse ash	Coarse aggregate	Curing temperature °C	AL/BA	SUM ADA _i (mm)	Avg. Compressive strength @ 90 days (ksc.)
OS55L6C	BAO	Lime Stone	60	0.55	7.35	365
RS55L4C	RBA	Lime Stone	40	0.55	4.54	458
RS65L6C	RBA	Lime Stone	60	0.65	13.29	309
RS60L6C	RBA	Lime Stone	60	0.60	4.47	402
RS55L6C	RBA	Lime Stone	60	0.55	7.02	439
RG55L6C	RBA	Gravel	60	0.55	2.96	376



ภาพประกอบ 21(ก) แผนภูมิแท่งแสดงการสึกกร่อนของจีโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพประกอบ 21(ข) แผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีต

ภาพประกอบ 21 แผนภูมิแท่งแสดงการสึกกร่อนและกำลังรับแรงอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีต
ที่เปลี่ยนแปลงชนิดเก่าชานอ้อย ชนิดมวลรวมหายาบ อุณหภูมิบ่ม และปริมาณสารอัลคาไลน์



(ก) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีหินปูนย่อยเป็นส่วนผสม
ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ

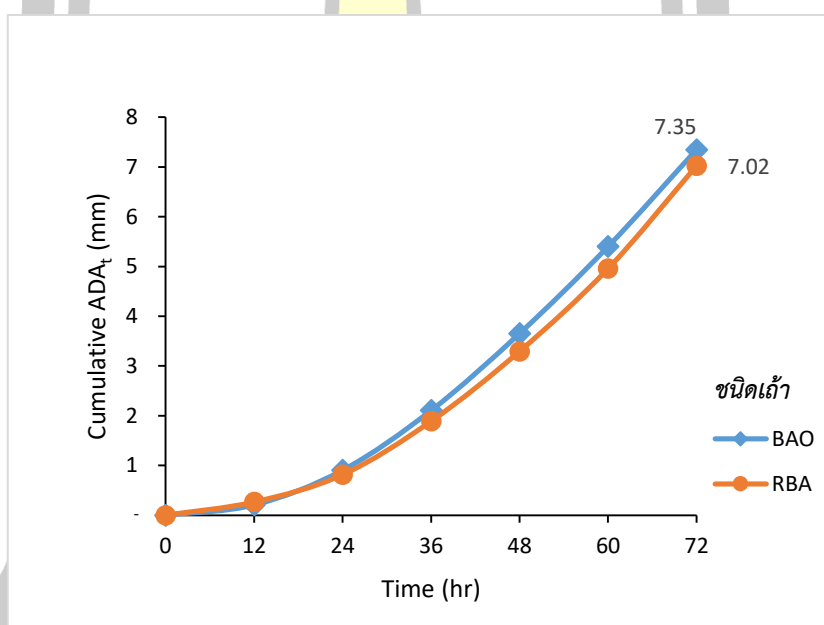


(ข) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกรวดเป็นส่วนผสม
ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ

ภาพประกอบ 22 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบใต้น้ำ

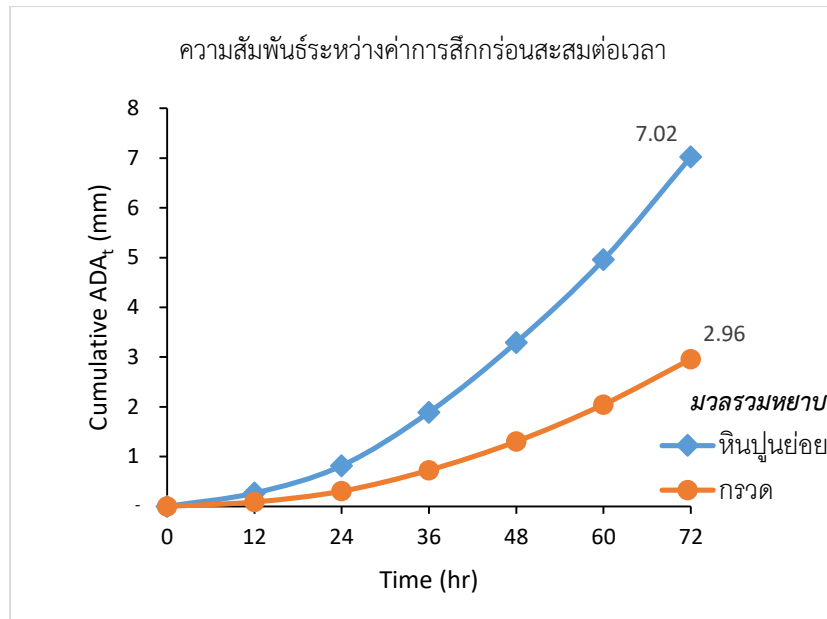
ภาพประกอบ 23 แสดงแนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยภาพประกอบ 23(ก) แสดงแนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงชนิดเถ้าชานอ้อย พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยเผาซ้ำมีค่าการสึกกร่อนน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมไม่มากนัก ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยดั้งเดิมและเผาซ้ำ มีค่าเท่ากับ 7.35 และ 7.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ภาพประกอบ 23(ข) แสดงแนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงชนิดมวลรวมหยาบ พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้กรวดในส่วนผสมมีค่าการสึกกร่อนน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยในส่วนผสม และมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและกรวดในส่วนผสม มีค่าเท่ากับ 7.02 และ 2.96 มิลลิเมตร ตามลำดับ

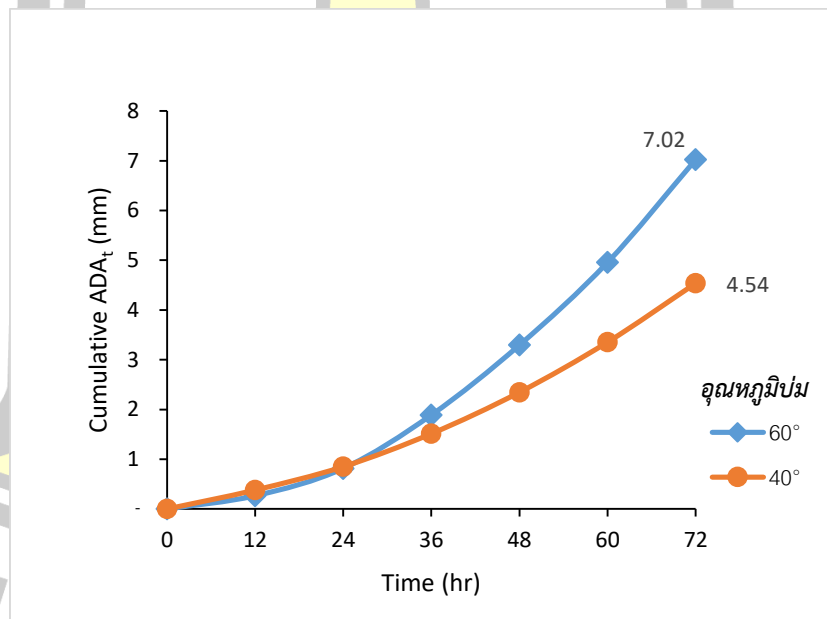


ภาพประกอบ 23(ก) แนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงชนิดเถ้าชานอ้อย

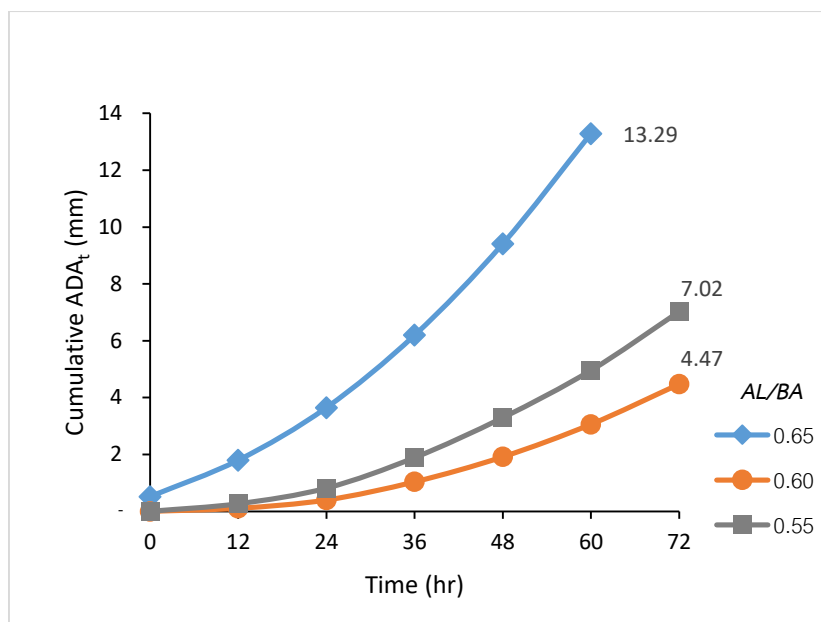
พหุ ประถม ชาติ ชีวะ



ภาพประกอบ 23(ข) แนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีไอโพลีเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงชนิดมวลรวมหายาบ



ภาพประกอบ 23(ค) แนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีไอโพลีเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม



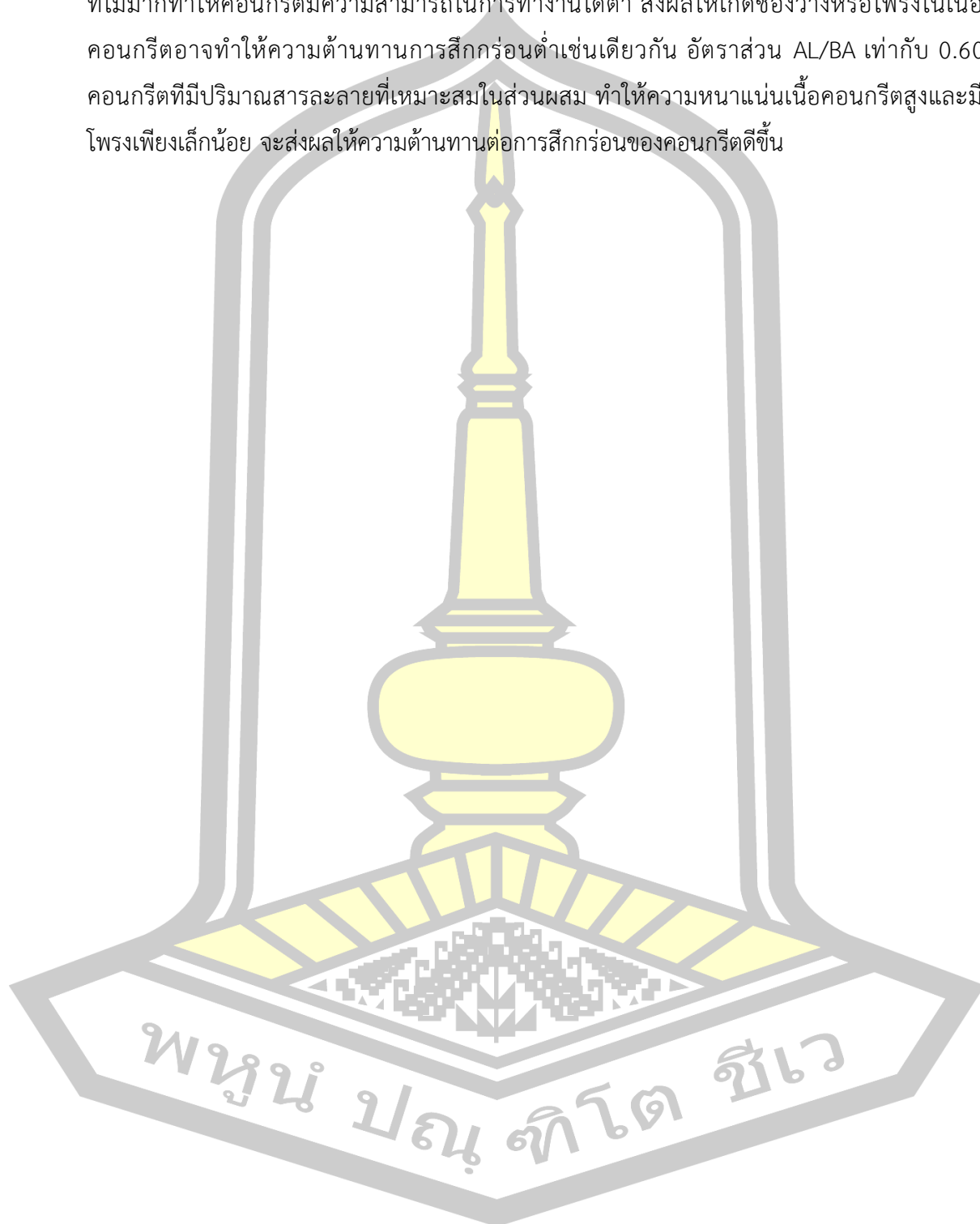
ภาพประกอบ 23(ง) แนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงปริมาณสารอัลคาไลน์

ภาพประกอบ 23 แนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงชนิดเถ้าขานอ้อย ชนิดมวลรวมหยาบ อุณหภูมิบ่ม และปริมาณสารอัลคาไลน์

ภาพประกอบ 23(ค) แสดงแนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า คือ 40 องศาเซลเซียส มีค่าการสึกกร่อนน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิสูงกว่า คือ 60 องศาเซลเซียส ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 และ 40 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 7.02 และ 4.54 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ภาพประกอบ 23(ง) แสดงแนวโน้มระหว่างค่าการสึกกร่อนสะสมต่อเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) 0.60 มีค่าการสึกกร่อนน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่ากว่าที่มีอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) 0.55 และ 0.65 ค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) 0.55 0.60 และ 0.65 มีค่าเท่ากับ 7.02 4.47 และ 13.29 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.65 ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์สูง ส่งผลเช่นเดียวกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (W/C) สูง ปริมาณสารละลายเกินความจำเป็นในการเกิดปฏิกิริยา สารละลายในส่วนนี้จะไปก่อให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง ส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไม่แข็งแรง กำลังรับแรงอัดต่ำ รวมถึงส่งผลให้ความต้านทาน

การสีกร่อนต่ำเช่นเดียวกัน อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.55 ปริมาณสารละลายในส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่มากทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ดี่า ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือโพรงในเนื้อคอนกรีตอาจทำให้ความต้านทานการสีกร่อนต่ำเช่นเดียวกัน อัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 คอนกรีตที่มีปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในส่วนผสม ทำให้ความหนาแน่นเนื้อคอนกรีตสูงและมีโพรงเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้ความต้านทานต่อการสีกร่อนของคอนกรีตดีขึ้น



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด อัตราการซึมผ่านน้ำและความต้านทานการสึกกร่อนของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัด

1.1 การเติมเศษอลูมิเนียมในส่วนผสมโดยแทนที่เถ้าขานอ้อย ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ทำให้จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 145

1.2 แหล่งที่มาและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยมีความสำคัญอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต เถ้าขานอ้อยที่มีการดูดซึมน้ำและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูง

1.3 อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) ส่งผลต่อทั้งกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต โดย AL/BA ต่ำ กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงแต่ความสามารถในการทำงานได้ต่ำ ตรงกันข้ามหาก AL/BA สูง กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำแต่ความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้น

1.4 การบ่มที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีในช่วงอายุต้น แตกต่างจากการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามอายุของคอนกรีต เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุคอนกรีต 28 ถึง 90 วัน การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเทียบเท่ากับการบ่มที่อุณหภูมิสูง

1.5 เถ้าขานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำก่อนนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจะทำให้ช่องว่างหรือพรงของอนุภาคลดลง ส่งผลให้เถ้าขานอ้อยมีความต้องการน้ำน้อยลงและมีขนาดอนุภาคเล็กส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม

1.6 ชนิดมวลรวมหยาบส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดโดยหินปูนย่อยที่มีลักษณะมีเหลี่ยมมุมผิวสัมผัสหยาบ ทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลีเมอร์เพสต์กับมวลรวมแข็งแรงกว่ามวลรวมหยาบชนิดกรวดที่มีลักษณะกลมมน ผิวสัมผัสเรียบ ทำให้จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยในส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้กรวดในส่วนผสม

2. อัตราการซึมผ่านน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต คอนกรีตที่มีกำลังรับรับแรงอัดสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำ จีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการเผาซ้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยดั้งเดิม ผลจากการใช้มวลรวมหยาบในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ผสมหินปูนย่อยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มี AL/BA เท่ากับ 0.55 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียมสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงกว่าซีเมนต์คอนกรีตทั่วไป

3. ความต้านทานการสึกกร่อน

จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียมมีความต้านทานการสึกกร่อนต่ำกว่าซีเมนต์คอนกรีต ค่าความต้านทานการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัด จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงจะมีค่าการสึกกร่อนต่ำ ยกเว้นคอนกรีตที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมจะมีค่าการสึกกร่อนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยในส่วนผสม เนื่องจากกรวดมีลักษณะโค้งมน เรียบและผิวสัมผัสลื่น ลดแรงเสียดทานได้ดี อีกทั้งปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสมคอนกรีตยังส่งผลต่อการสึกกร่อน โดยจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน AL/BA ต่ำ ปริมาณสารละลายในส่วนผสมคอนกรีตไม่เพียงพอ คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำ ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือโพรงในเนื้อคอนกรีต การยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับวัสดุมวลรวมไม่แข็งแรง ส่งผลให้ความต้านทานการสึกกร่อนต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาและพัฒนาความสามารถที่ครอบคลุมไปกับการกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. ศึกษาการลดอุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์หรือพัฒนาให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ในสภาพแวดล้อมปกติ

บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์ มาโยธา และวัชรพงษ์ ชูยอวน. (2560). การพัฒนากำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจาก
เถ้าขานอ้อยผสมเศษขลุมิเนียม. ปรินูญานินพณ์ วศ.บ. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology). (2543). หนังสือวิชาการคอนกรีต บริษัทผลิตภัณฑ์และ
วัสดุก่อสร้างจำกัด, 140.
- คาวี มนทการติวงค์. (2548). ผลกระทบของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่มีผลต่อ
กำลังอัดและความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี.
- จักรพันธ์ วงษ์พา. (2552). การพัฒนาเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.
ประชาคมวิจัย, 85, 75-76.
- นาวิน เกขุนทด สหลาก หอมวุฒินวงศ์ และมณีรัตน์ องค์กรวรรณดี. (2555). การประเมินการสึกกร่อนของ
คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน. วารสารวิศวกรรมมข. 39(1). 23-34
- ปกป้อง รัตนชู และคณะ. (2559). สมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษ
คอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับ เถ้าขานอ้อยบดละเอียด. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่ง
ประเทศไทย, 4(2).
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ. (2548). สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ. วิศวกรรมสาร มข.,
32(5), 715-724.
- เพ็ญชาย เวียงใต้. (2553). การศึกษาความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย. ปรินูญานินพณ์ วศ.บ.
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- วรายศ วิฑูธีรศานต์ และคณะ. (2557). การผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยวัสดุเหลือทิ้ง. วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 21, 1-9.

- สมหมาย ศรีสุธรรม และอนวัต โยธากุล. (2560). การพัฒนากำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์มอดาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษขลุมิเนียม. ปรินูญานินพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยมหาสารคาม.
- สพลาภ หอมวุฒิวงศ์. (2557). การสีก้อนของคอนกรีตและการทดสอบ. วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย. (2559). รายงานการผลิตอ้อยและน้ำตาล. Retrieved from <http://www.ocsb.go.th>
- สำเร็จ รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรหม. (2553). การพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร.
- สุวิมล สัจจาณิษฐ์. (2546). ผลกระทบของเถ้าชานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน. วิศวกรรมสาร มก., 48, 18–22.
- อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์. (2551). ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ. (2549). การศึกษาการชะเถ้าถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 29(4).
- Assi, L. N., Deaver, E., Elbatanouny, M. K., & Ziehl, P. (2016). Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 807–815.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.008>
- 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.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse

ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 23(12), 3523–3531.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046>

CPAC Concrete Academy. (2013). Concrete Mixing Design. *Concrete Technology*.

Chapter18: Concrete Mixing Design. Retrieved from <https://www.cpacacademy.com>

Dobrowolski, T. (2011). The dynamics of the kink in curved large area josephson

junction. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S*, 4(5), 1095–1105.

Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.045>

Dter, T. (2014). Concrete durability. *Concrete Durability*. Taylor & Francis Group.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van

Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art.

Journal of Materials Science, 42(9), 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

Fairbairn, E. M. R., Americano, B. B., Cordeiro, G. C., Paula, T. P., Toledo Filho, R. D., &

Silvoso, M. M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash:

CO₂emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1864–1871.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.008>

Haddad and Alshbuol, 2016. (2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Construction and Building Materials*, 114, 699–707.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.011>

Noor-Ul-Amin, Faisal, M., Muhammad, K., & Gul, S. (2016). Synthesis and characterization of geopolymer from bagasse bottom ash, waste of sugar industries and naturally

available China clay. *Journal of Cleaner Production*, 129, 491–495.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.024>

Tan, X. (2013). A 3D model asymmetric watermarking algorithm based on optimization statistics. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 51(2), 175–181.

Tippayasam, C., Keawpapasson, P., Thavorniti, P., Panyathanmaporn, T., Leonelli, C., & Chaysuwan, D. (2014). Effect of Thai Kaolin on properties of agricultural ash blended geopolymers. *Construction and Building Materials*, 53, 455–459.

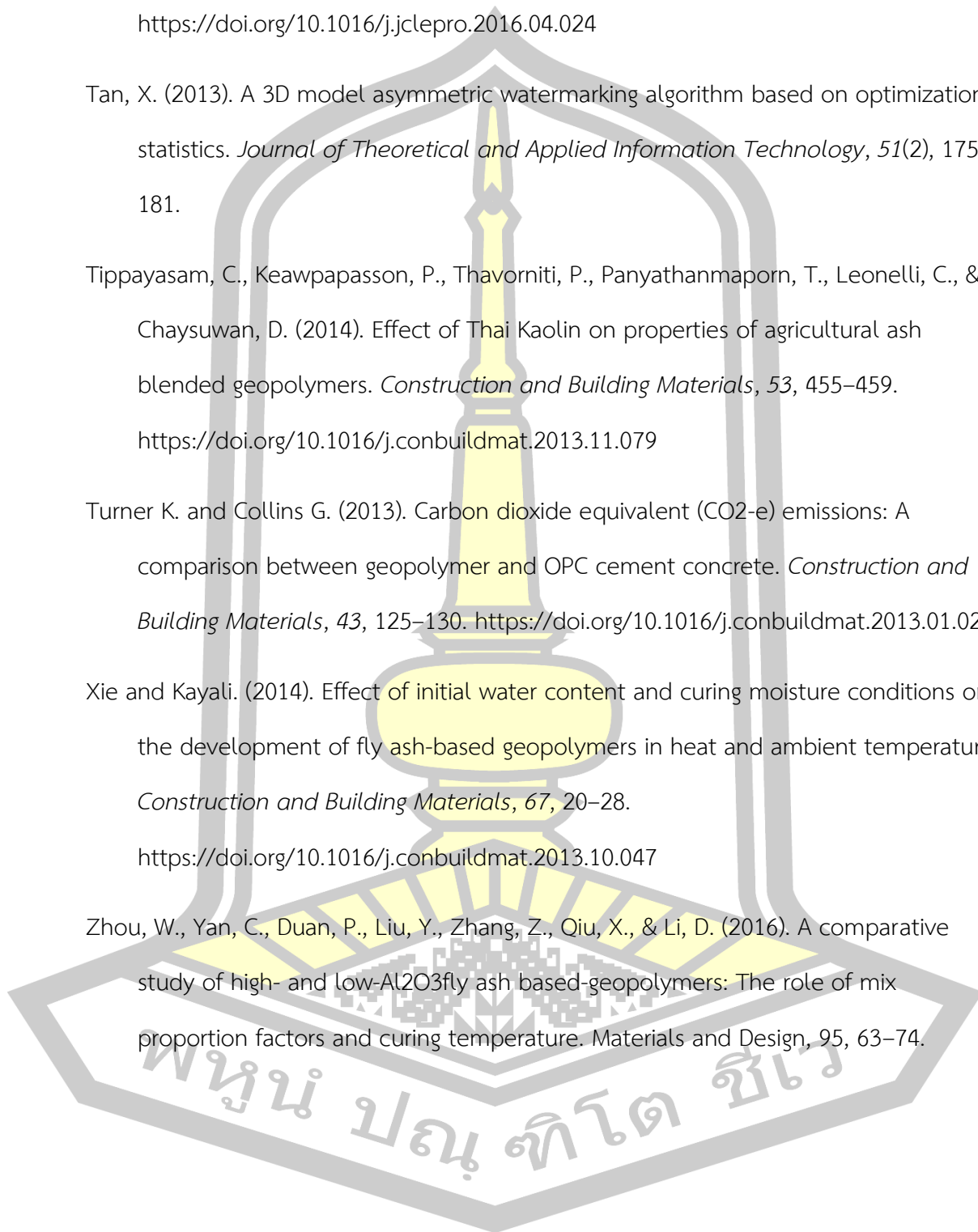
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.079>

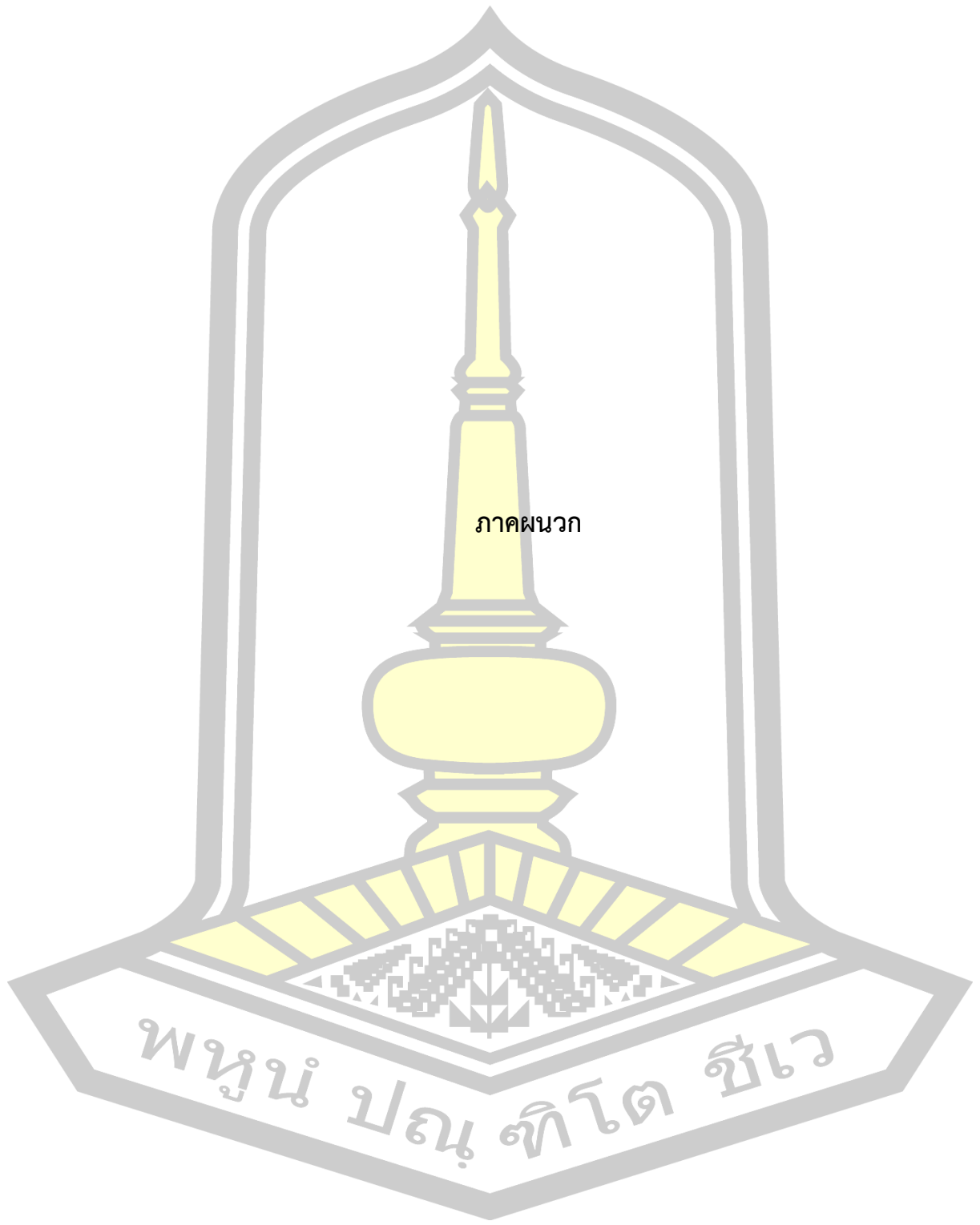
Turner K. and Collins G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>

Xie and Kayali. (2014). Effect of initial water content and curing moisture conditions on the development of fly ash-based geopolymers in heat and ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 67, 20–28.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.047>

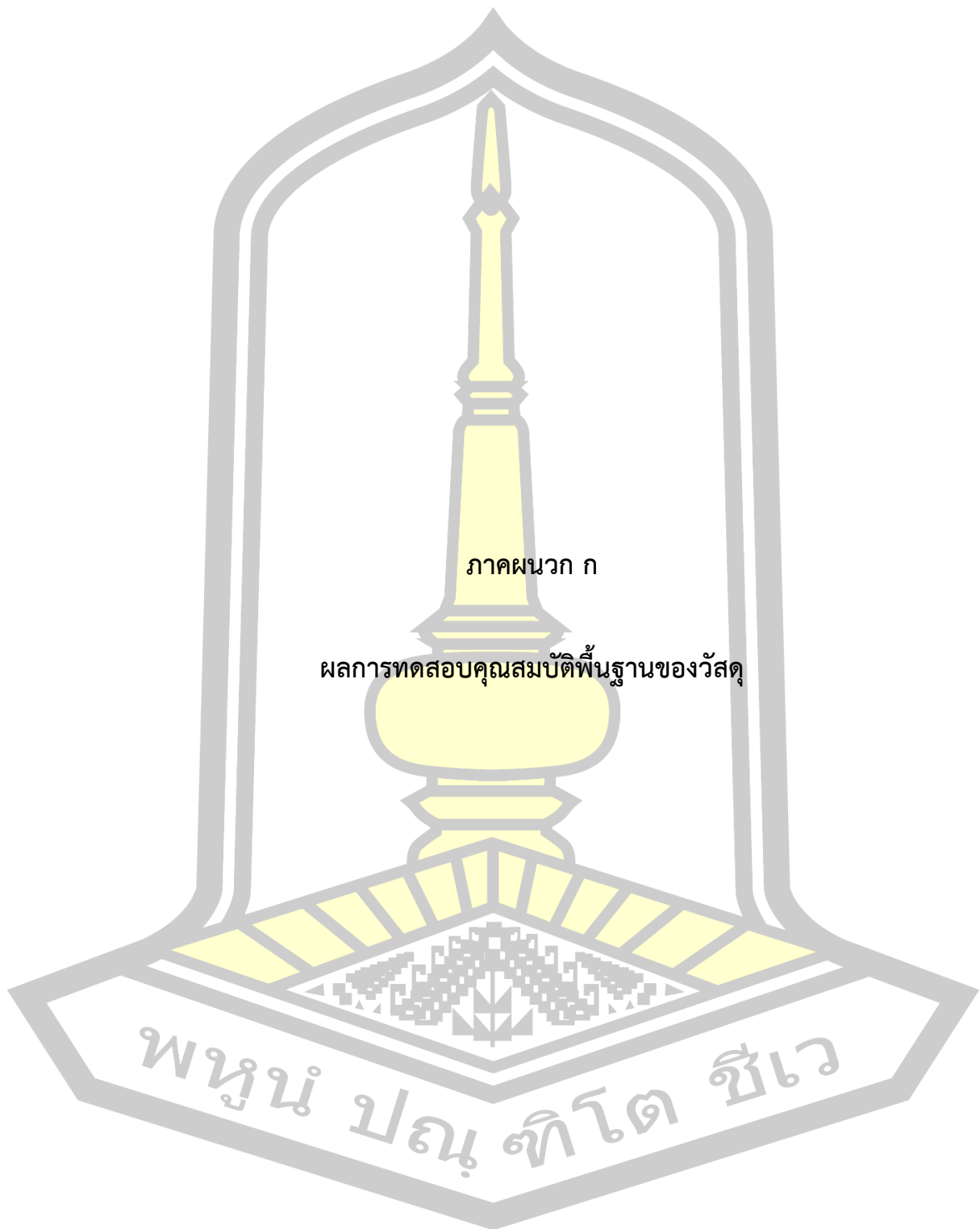
Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qiu, X., & Li, D. (2016). A comparative study of high- and low-Al₂O₃ fly ash based geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. *Materials and Design*, 95, 63–74.





ภาคผนวก

พุ่ม ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

พูน ปรณ ชิต ชีวะ

ตาราง ก1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อยแหล่ง A (ก่อนบด)

รายการ	ค่าการทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง, W (กรัม)	48.1
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ชม.)	-1.0
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ชม.)	24.0
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง, V (ลบ.ชม.)	25.0
ความหนาแน่นน้ำ, p (ก./ลบ.ชม.)	1.00
ความถ่วงจำเพาะ = $W/V \cdot p$	<u>1.92</u>

ตาราง ก2 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อยแหล่ง A (หลังบด)

รายการ	ค่าการทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง, W (กรัม)	49.5
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ชม.)	-1.0
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ชม.)	20.1
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง, V (ลบ.ชม.)	21.1
ความหนาแน่นน้ำ, p (ก./ลบ.ชม.)	1.00
ความถ่วงจำเพาะ = $W/V \cdot p$	<u>2.35</u>

ตาราง ก3 ผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำเถ้าชานอ้อยแหล่ง A (ก่อนบด)

รายการ	ค่าการทดลอง
น้ำหนัก SSD (กรัม)	402.0
น้ำหนักแห้ง (กรัม)	370.0
การดูดซึมน้ำ (%)	<u>8.65</u>

ตาราง ก4 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อยแห้ง B (ก่อนบด)

รายการ	ค่าการทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง, W (กรัม)	44.7
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ชม.)	-1.0
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ชม.)	24.0
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง, V (ลบ.ชม.)	25.0
ความหนาแน่นน้ำ, p (ก./ลบ.ชม.)	1.00
ความถ่วงจำเพาะ = $W/V \cdot p$	<u>1.79</u>

ตาราง ก5 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อยแห้ง B (หลังบด)

รายการ	ค่าการทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง, W (กรัม)	50.0
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ชม.)	0
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ชม.)	22.9
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง, V (ลบ.ชม.)	22.9
ความหนาแน่นน้ำ, p (ก./ลบ.ชม.)	1.00
ความถ่วงจำเพาะ = $W/V \cdot p$	<u>2.18</u>

ตาราง ก6 ผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำเถ้าชานอ้อยแห้ง B (ก่อนบด)

น้ำหนัก SSD (กรัม)	248.0
น้ำหนักแห้ง (กรัม)	217.0
การดูดซึมน้ำ (%)	<u>14.29</u>

ตาราง ก7 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อยแห้ง A-เผาซ้ำ (หลังบด)

รายการ	ค่าการทดลอง
น้ำหนักตัวอย่าง, W (กรัม)	50.0
ปริมาณเริ่มต้น (ลบ.ชม.)	-0.2
ปริมาณสุดท้าย (ลบ.ชม.)	19.7
ปริมาณที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง, V (ลบ.ชม.)	19.9
ความหนาแน่นน้ำ, p (ก./ลบ.ชม.)	1.00
ความถ่วงจำเพาะ = $W/V \cdot p$	<u>2.52</u>

ตาราง ก8 ผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำเถ้าชานอ้อยแห้ง A-เผาซ้ำ (ก่อนบด)

น้ำหนัก SSD (กรัม)	400.0
น้ำหนักแห้ง (กรัม)	372.0
การดูดซึมน้ำ (%)	<u>7.53</u>

ตาราง ก9 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)

ชนิดเถ้า	น้ำหนักก่อนเผา (g)	น้ำหนักหลังเผา (g)	LOI (%)
แห้ง A	5000	4365	12.70
แห้ง B	5000	4085	18.30
แห้ง A-เผาซ้ำ	5000	4675	6.50

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ตาราง ข1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1 (อายุคอนกรีต 3 วัน)

No.	BA Source	Replace bagasse ash with aluminum scrap (%)	AL/BA	Curing temperature (°C)	กำลังอัดที่อายุ 3 วัน			เฉลี่ย (ksc)
					Sample 1 (ksc)	Sample 2 (ksc)	Sample 3 (ksc)	
1	A	0.0	0.60	60	146.73	143.74	146.58	<u>146</u>
2		0.2	0.60	60	161.38	172.63	165.00	<u>166</u>
3		0.4	0.60	60	249.70	245.37	191.92	<u>229</u>
4		0.6	0.60	60	171.37	161.06	142.56	<u>158</u>
5		0.8	0.60	60	128.08	106.35	138.86	<u>124</u>
6		1.0	0.60	60	110.29	89.19	93.60	<u>98</u>
7	B	0.0	0.60	60	30.02	27.33	26.33	<u>28</u>
8		0.2	0.60	60	36.93	31.47	33.50	<u>34</u>
9		0.4	0.60	60	53.61	45.13	50.32	<u>50</u>
10		0.6	0.60	60	35.61	34.40	26.98	<u>32</u>
11		0.8	0.60	60	24.29	29.02	22.92	<u>25</u>
12		1.0	0.60	60	22.68	16.99	16.44	<u>19</u>
13	A	0.4	0.50	60	270.95	260.29	284.71	<u>272</u>
14	A	0.4	0.55	60	229.27	232.81	258.03	<u>240</u>
15	A	0.4	0.65	60	162.62	156.26	155.22	<u>158</u>
16	A	0.4	0.60	80	275.60	268.44	259.63	<u>268</u>
17	A	0.4	0.60	100	294.03	280.13	280.23	<u>285</u>



ตาราง ข2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1 (อายุคอนกรีต 7 วัน)

No.	BA Source	Replace bagasse ash with aluminum scrap (%)	AL/BA	Curing temperature (°C)	กำลังอัดที่อายุ 7 วัน			เฉลี่ย (ksc)
					Sample 1	Sample 2	Sample 3	
					(ksc)	(ksc)	(ksc)	
1	A	0.0	0.60	60	154.68	167.36	171.37	<u>164</u>
2		0.2	0.60	60	155.63	185.78	197.74	<u>180</u>
3		0.4	0.60	60	239.78	228.13	247.26	<u>238</u>
4		0.6	0.60	60	160.20	195.86	186.88	<u>181</u>
5		0.8	0.60	60	165.78	173.26	173.89	<u>171</u>
6		1.0	0.60	60	146.58	133.27	103.60	<u>128</u>
7	B	0.0	0.60	60	36.89	38.23	38.23	<u>38</u>
8		0.2	0.60	60	51.10	38.61	34.15	<u>41</u>
9		0.4	0.60	60	49.78	60.01	54.51	<u>55</u>
10		0.6	0.60	60	32.83	36.00	35.11	<u>35</u>
11		0.8	0.60	60	28.96	38.84	43.49	<u>37</u>
12		1.0	0.60	60	33.16	25.91	29.01	<u>29</u>
13	A	0.4	0.50	60	278.36	280.81	330.69	<u>297</u>
14	A	0.4	0.55	60	287.05	239.82	258.01	<u>262</u>
15	A	0.4	0.65	60	143.27	163.80	195.48	<u>168</u>
16	A	0.4	0.60	80	289.73	274.53	273.64	<u>279</u>
17	A	0.4	0.60	100	301.53	307.37	276.63	<u>295</u>



ตาราง ข3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวแปรศึกษาส่วนที่ 1 (อายุคอนกรีต 28 วัน)

No.	BA Source	Replace bagasse ash with aluminum scrap (%)	AL/BA	Curing temperature (°C)	กำลังอัดที่อายุ 28 วัน			เฉลี่ย (ksc)
					Sample 1	Sample 2	Sample 3	
					(ksc)	(ksc)	(ksc)	
1	A	0.0	0.60	60	189.95	185.78	199.24	<u>192</u>
2		0.2	0.60	60	193.65	211.99	190.97	<u>199</u>
3		0.4	0.60	60	278.90	286.38	281.11	<u>282</u>
4		0.6	0.60	60	190.50	191.50	200.11	<u>194</u>
5		0.8	0.60	60	159.33	187.43	139.58	<u>173</u>
6		1.0	0.60	60	139.18	179.95	161.93	<u>160</u>
7	B	0.0	0.60	60	49.88	47.17	49.71	<u>49</u>
8		0.2	0.60	60	50.68	50.68	58.54	<u>53</u>
9		0.4	0.60	60	79.42	78.89	79.35	<u>79</u>
10		0.6	0.60	60	48.81	44.15	40.77	<u>45</u>
11		0.8	0.60	60	40.37	38.29	40.83	<u>40</u>
12		1.0	0.60	60	29.53	47.41	33.58	<u>37</u>
13	A	0.4	0.50	60	313.93	285.79	296.95	<u>299</u>
14	A	0.4	0.55	60	301.14	289.99	288.89	<u>293</u>
15	A	0.4	0.65	60	191.45	187.56	189.77	<u>190</u>
16	A	0.4	0.60	80	296.00	297.50	283.50	<u>292</u>
17	A	0.4	0.60	100	304.22	303.37	302.23	<u>303</u>



ตาราง ข4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2 (อายุคอนกรีต 3 วัน)

no.	Type BA	ชนิด มวลรวม หยาบ	อุณหภูมิ (°C)	AL/BA	ผลการทดสอบ			
					กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน (ksc)			
					ก้อน 1	ก้อน 2	ก้อน 3	เฉลี่ย
1	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.65	105.38	107.85	99.95	104.39
2	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.60	128.33	138.45	128.82	131.87
3	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.55	152.76	120.19	122.41	131.79
4	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.65	156.70	160.66	157.20	158.19
5	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.60	183.85	170.39	190.68	181.64
6	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.55	251.57	280.51	213.28	248.45
7	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.65	46.39	49.61	49.61	48.54
8	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.60	55.53	55.53	54.54	55.20
9	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.55	89.58	73.30	69.60	77.49
10	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.65	134.28	109.87	104.32	116.16
11	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.60	151.52	157.90	157.70	155.71
12	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.55	74.25	177.44	72.23	177.44
13	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.65	92.62	88.66	95.58	92.29
14	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.60	117.47	107.33	111.41	112.07
15	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.55	135.73	162.14	167.56	164.85
16	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.65	191.51	199.65	194.97	195.38
17	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.60	240.86	262.09	237.40	246.78
18	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.55	163.53	271.05	309.32	290.19
19	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.65	43.43	41.95	44.43	43.27
20	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.60	76.26	71.82	67.86	71.98
21	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.55	76.50	106.37	101.93	94.93
22	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.65	112.40	112.65	116.36	113.80
23	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.60	138.68	132.90	127.86	133.15
24	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.55	135.24	142.40	136.23	137.95

ตาราง ข5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2 (อายุคอนกรีต 7 วัน)

no.	Type BA	ชนิด มวลรวม หยาบ	อุณหภูมิ (°C)	AL/BA	ผลการทดสอบ			
					กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน (ksc)			
					ก้อน 1	ก้อน 2	ก้อน 3	เฉลี่ย
1	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.65	135.24	126.85	135.24	132.44
2	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.60	165.84	138.45	168.56	167.20
3	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.55	187.16	180.15	178.91	182.07
4	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.65	178.67	153.50	171.76	167.98
5	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.60	229.10	210.92	214.88	218.30
6	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.55	288.74	316.62	291.95	290.34
7	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.65	86.38	75.76	73.78	78.64
8	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.60	73.78	77.24	94.77	81.93
9	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.55	100.25	151.52	111.05	120.94
10	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.65	130.39	120.33	132.86	127.86
11	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.60	141.77	184.83	187.54	171.38
12	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.55	77.74	181.89	173.00	181.89
13	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.65	149.06	135.24	151.04	145.11
14	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.60	175.47	173.74	170.28	173.16
15	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.55	217.17	183.37	163.12	200.27
16	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.65	193.49	194.71	203.85	197.35
17	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.60	261.10	254.44	255.43	256.99
18	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.55	304.78	325.26	308.24	312.76
19	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.65	65.64	68.60	78.24	70.83
20	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.60	83.42	93.78	85.14	87.45
21	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.55	112.03	142.40	147.34	133.92
22	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.65	147.52	134.47	116.11	132.70
23	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.60	147.33	144.74	105.48	146.04
24	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.55	116.56	170.02	154.32	162.17

ตาราง ข6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2 (อายุคอนกรีต 28 วัน)

no.	Type BA	ชนิด มวลรวม หยาบ	อุณหภูมิ (°C)	AL/BA	ผลการทดสอบ			
					กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (ksc)			
					ก้อน 1	ก้อน 2	ก้อน 3	เฉลี่ย
1	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.65	191.75	202.85	177.69	197.30
2	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.60	236.42	254.93	236.18	242.51
3	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.55	290.96	270.47	307.98	289.80
4	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.65	183.11	178.43	195.71	185.75
5	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.60	249.13	241.28	237.49	242.64
6	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.55	306.38	303.84	301.21	303.81
7	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.65	99.54	123.96	132.06	118.52
8	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.60	159.51	176.70	177.75	171.32
9	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.55	194.71	248.76	242.84	228.77
10	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.65	116.68	141.83	158.46	150.15
11	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.60	222.88	215.96	232.84	223.89
12	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.55	225.98	125.01	47.79	225.98
13	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.65	206.56	224.33	221.62	217.50
14	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.60	242.10	246.78	253.20	247.36
15	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.55	339.83	302.06	326.00	322.63
16	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.65	232.22	236.42	236.40	235.01
17	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.60	295.90	296.14	279.11	296.02
18	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.55	337.26	344.37	343.38	341.67
19	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.65	154.24	148.82	151.78	151.61
20	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.60	187.31	196.93	162.64	192.12
21	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.55	200.89	242.59	246.04	244.32
22	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.65	194.71	169.79	191.01	185.17
23	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.60	233.96	227.04	217.17	226.06
24	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.55	222.85	249.50	219.88	230.75

ตาราง ข7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวแปรศึกษาส่วนที่ 2 (อายุคอนกรีต 90 วัน)

no.	Type BA	ชนิด มวลรวม หยาบ	อุณหภูมิ (°C)	AL/BA	ผลการทดสอบ			
					กำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน (ksc)			
					ก้อน 1	ก้อน 2	ก้อน 3	เฉลี่ย
1	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.65	276.89	263.07	271.71	270.56
2	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.60	330.20	335.63	326.25	330.69
3	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	40	0.55	372.40	369.19	352.41	364.67
4	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.65	234.20	230.50	232.22	232.31
5	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.60	283.00	293.22	321.15	299.13
6	ตั้งเดิม	หินปูนย่อย	60	0.55	366.23	365.49	383.26	371.66
7	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.65	234.94	233.96	226.30	231.73
8	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.60	282.08	294.95	299.40	292.14
9	ตั้งเดิม	หินกรวด	40	0.55	350.19	352.17	345.01	349.12
10	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.65	229.00	221.22	216.78	222.33
11	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.60	278.62	280.85	290.71	283.39
12	ตั้งเดิม	หินกรวด	60	0.55	330.45	250.24	268.51	299.48
13	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.65	351.91	359.57	348.47	353.32
14	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.60	404.98	392.88	397.57	398.48
15	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	40	0.55	483.45	481.73	409.60	458.26
16	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.65	306.02	308.48	313.42	309.31
17	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.60	400.28	408.93	395.35	401.52
18	เผาซ้ำ	หินปูนย่อย	60	0.55	411.64	462.72	443.47	439.28
19	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.65	263.81	268.99	294.57	275.79
20	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.60	296.88	293.92	308.72	299.84
21	เผาซ้ำ	หินกรวด	40	0.55	340.32	375.36	342.05	352.58
22	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.65	296.39	289.23	294.17	293.27
23	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.60	338.35	326.25	342.05	335.55
24	เผาซ้ำ	หินกรวด	60	0.55	365.49	387.94	375.12	376.18

ตาราง ข8 ตัวอย่างผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ตัวอย่างทดสอบที่ 6-1

No.	time (sec)	level (cm)	q (m ³)	Q (m ³ /sec)	Kf (m/sec)	Average
1	18.63	5.00	9.193E-06	4.934E-07	2.465E-07	2.245E-07
	19.17	5.00	9.193E-06	4.795E-07	2.396E-07	
	19.95	5.00	9.193E-06	4.608E-07	2.302E-07	
	20.53	5.00	9.193E-06	4.478E-07	2.237E-07	
	42.58	10.00	1.839E-05	4.318E-07	2.157E-07	
	21.86	5.00	9.193E-06	4.205E-07	2.101E-07	
	22.30	5.00	9.193E-06	4.122E-07	2.060E-07	
2	19.24	5.00	9.193E-06	4.778E-07	2.387E-07	2.222E-07
	19.27	5.00	9.193E-06	4.770E-07	2.383E-07	
	20.33	5.00	9.193E-06	4.522E-07	2.259E-07	
	20.44	5.00	9.193E-06	4.497E-07	2.247E-07	
	43.05	10.00	1.839E-05	4.271E-07	2.134E-07	
	21.64	5.00	9.193E-06	4.248E-07	2.122E-07	
	22.69	5.00	9.193E-06	4.051E-07	2.024E-07	
3	19.93	5.00	9.193E-06	4.612E-07	2.304E-07	2.138E-07
	20.41	5.00	9.193E-06	4.504E-07	2.250E-07	
	21.12	5.00	9.193E-06	4.353E-07	2.175E-07	
	22.08	5.00	9.193E-06	4.163E-07	2.080E-07	
	43.51	10.00	1.839E-05	4.226E-07	2.111E-07	
	22.10	5.00	9.193E-06	4.160E-07	2.078E-07	
	23.36	5.00	9.193E-06	3.935E-07	1.966E-07	
					Average	<u>2.202E-07</u>

ตาราง ข9 ตัวอย่างผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ตัวอย่างทดสอบที่ 6-2

No.	time (sec)	level (cm)	q (m ³)	Q (m ³ /sec)	Kf (m/sec)	Average
1	15.40	5.00	9.193E-06	5.969E-07	2.982E-07	2.685E-07
	16.72	5.00	9.193E-06	5.498E-07	2.747E-07	
	16.48	5.00	9.193E-06	5.578E-07	2.787E-07	
	17.15	5.00	9.193E-06	5.360E-07	2.678E-07	
	35.57	10.00	1.839E-05	5.169E-07	2.582E-07	
	18.23	5.00	9.193E-06	5.043E-07	2.519E-07	
	18.39	5.00	9.193E-06	4.999E-07	2.497E-07	
2	16.53	5.00	9.193E-06	5.561E-07	2.778E-07	2.541E-07
	16.82	5.00	9.193E-06	5.465E-07	2.731E-07	
	17.47	5.00	9.193E-06	5.262E-07	2.629E-07	
	18.56	5.00	9.193E-06	4.953E-07	2.475E-07	
	37.12	10.00	1.839E-05	4.953E-07	2.475E-07	
	19.06	5.00	9.193E-06	4.823E-07	2.410E-07	
	20.07	5.00	9.193E-06	4.580E-07	2.288E-07	
					Average	2.613E-07



ตาราง ข10 ตัวอย่างผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ตัวอย่างทดสอบที่ 6-3

No.	time (sec)	level (cm)	q (m ³)	Q (m ³ /sec)	Kf (m/sec)	Average
1	23.81	5.00	9.193E-06	3.861E-07	1.929E-07	1.767E-07
	25.67	5.00	9.193E-06	3.581E-07	1.789E-07	
	25.46	5.00	9.193E-06	3.611E-07	1.804E-07	
	26.02	5.00	9.193E-06	3.533E-07	1.765E-07	
	52.30	10.00	1.839E-05	3.515E-07	1.756E-07	
	26.98	5.00	9.193E-06	3.407E-07	1.702E-07	
	28.28	5.00	9.193E-06	3.251E-07	1.624E-07	
2	25.58	5.00	9.193E-06	3.594E-07	1.795E-07	1.753E-07
	25.25	5.00	9.193E-06	3.641E-07	1.819E-07	
	25.03	5.00	9.193E-06	3.673E-07	1.835E-07	
	25.37	5.00	9.193E-06	3.623E-07	1.810E-07	
	53.66	10.00	1.839E-05	3.426E-07	1.712E-07	
	27.53	5.00	9.193E-06	3.339E-07	1.668E-07	
	28.21	5.00	9.193E-06	3.259E-07	1.628E-07	
					Average	1.760E-07

ตาราง ข11 ตัวอย่างผลการทดสอบ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ตัวอย่างทดสอบที่ 6

Sample	Kf (m/sec)	avr.Kf (m/sec)
06-1	2.202E-07	2.192E-07
06-2	2.613E-07	
06-3	1.760E-07	

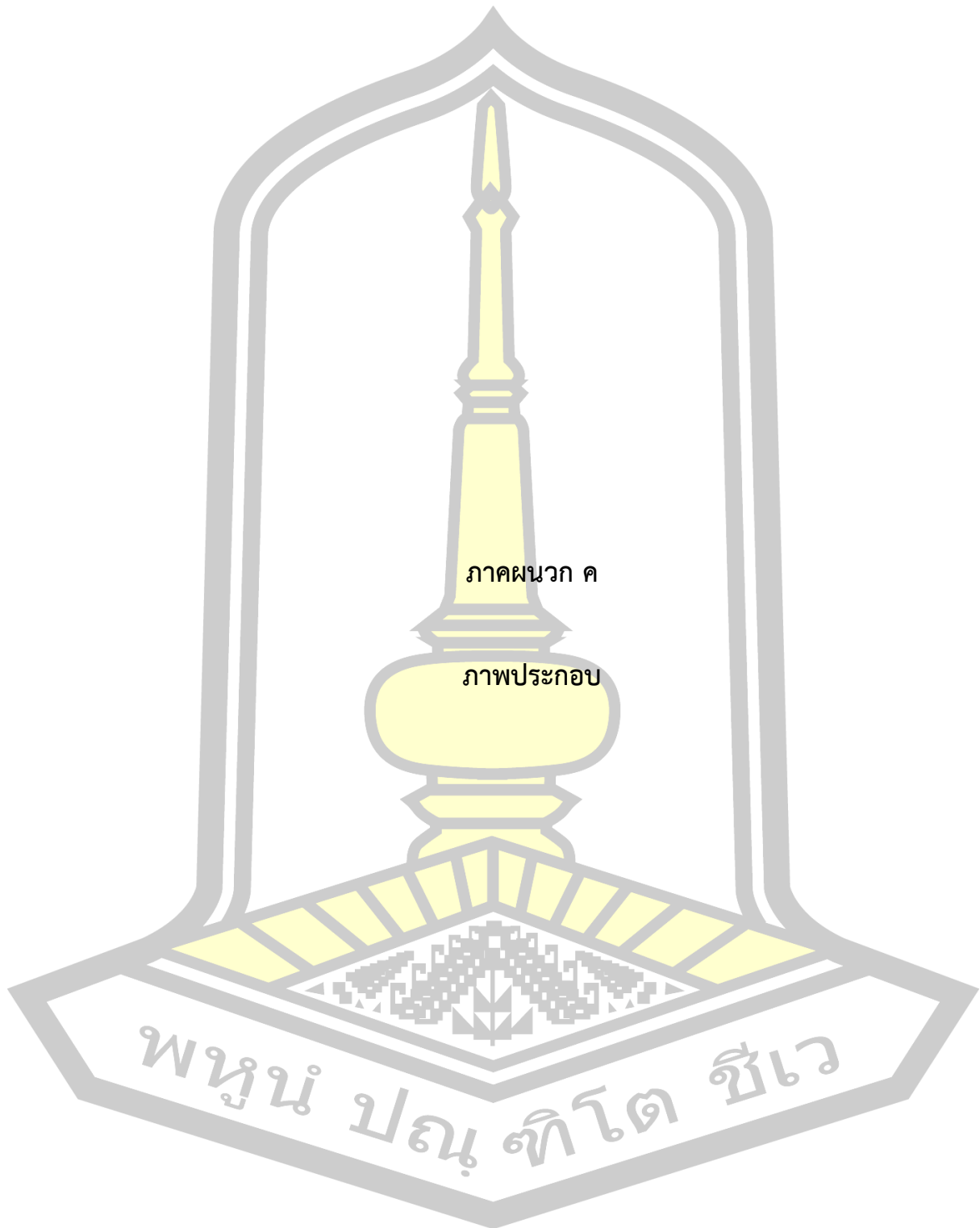
ตาราง ข12 ตัวอย่างผลการทดสอบ ค่าการสึกกร่อน ตัวอย่างทดสอบที่ 15

Samples No. 15-1											Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W _{air} (kg)	W _{water} (kg)	G _w (kg/m ³)	V _i (m ³)	V _t (m ³)	V _{L_t} (m ³)	A (m ²)	ADA _t (m)	ADA _t (mm)	
Start	0	16.580	9.600	1000	0.00698		0	0.06761	0	0	
Round 1	12	16.572	9.638	1000		0.00693	0.00005		0.0007	0.6814	
Round 2	24	16.541	9.613	1000		0.00693	0.00005		0.0008	0.7708	
Round 3	36	16.513	9.599	1000		0.00691	0.00007		0.0010	0.9673	
Round 4	48	16.483	9.577	1000		0.00691	0.00007		0.0011	1.0924	
Round 5	60	16.454	9.558	1000		0.00690	0.00008		0.0012	1.2353	
Round 6	72	16.425	9.538	1000		0.00689	0.00009	End	0.0014	1.3782	6.13

Samples No. 15-2											Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W _{air} (kg)	W _{water} (kg)	G _w (kg/m ³)	V _i (m ³)	V _t (m ³)	V _{L_t} (m ³)	A (m ²)	ADA _t (m)	ADA _t (mm)	
Start	0	16.143	9.341	1000	0.00680		0	0.06502	0	0	
Round 1	12	16.135	9.339	1000		0.006796	0.00001		0.0001	0.0923	
Round 2	24	16.105	9.315	1000		0.00679	0.00001		0.0002	0.1846	
Round 3	36	16.078	9.301	1000		0.006777	0.00003		0.0004	0.3845	
Round 4	48	16.049	9.286	1000		0.006763	0.00004		0.0006	0.6050	
Round 5	60	16.021	9.272	1000		0.006749	0.00005		0.0008	0.8203	
Round 6	72	15.992	9.257	1000		0.006735	0.00007	End	0.0010	1.0356	3.12

Samples No. 15-3											Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	W _{air} (kg)	W _{water} (kg)	G _w (kg/m ³)	V _i (m ³)	V _t (m ³)	V _{L_t} (m ³)	A (m ²)	ADA _t (m)	ADA _t (mm)	
Start	0	16.362	9.471	1000	0.00689		0	0.07071	0	0	
Round 1	12	16.353	9.488	1000		0.00686	0.00003		0.0004	0.3681	
Round 2	24	16.323	9.464	1000		0.00686	0.00003		0.0005	0.4533	
Round 3	36	16.296	9.450	1000		0.00685	0.00005		0.0006	0.6391	
Round 4	48	16.266	9.432	1000		0.00683	0.00006		0.0008	0.8003	
Round 5	60	16.237	9.415	1000		0.00682	0.00007		0.0010	0.9676	
Round 6	72	16.208	9.398	1000		0.00681	0.00008	End	0.0011	1.1349	4.36

Average											
Sample No.15											Remark
Round (12 hr./round)	Time (hr)	No.1	No.2	No.3	Average						
		ADA _t (mm)	ADA _t (mm)	ADA _t (mm)	ADA _t (mm)						
Start	0										
Round 1	12	0.68	0.09	0.37	0.38						
Round 2	24	0.77	0.18	0.45	0.47						
Round 3	36	0.97	0.38	0.64	0.66						
Round 4	48	1.09	0.60	0.80	0.83						
Round 5	60	1.24	0.82	0.97	1.01						
Round 6	72	1.38	1.04	1.13	1.18						
SUM									4.54	mm	





ภาพประกอบ ค1 ถ้ำขานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล



ภาพประกอบ ค2 ตากถ้ำขานอ้อยเพื่อขจัดความชื้น



ภาพประกอบ ค3 บดถ้ำขานอ้อยด้วยเครื่องบดแบบตกรกระทบ



(ก) ถ้ำซานอ้อยเผาซ้ำ



(ข) ถ้ำซานอ้อยตั้งเดิม



(ค) เศษอลูมิเนียม

ภาพประกอบ ค4 วัสดุตั้งต้นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



(ก) หินปูนย่อย



(ข) กรวดแม่น้ำ

ภาพประกอบ ค5 วัสดุมวลรวมหายาบ



ภาพประกอบ ค6 อุปกรณ์สำหรับเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



(ก) ถ้ำซันอ้อยเผาซ้ําและถ้ำซันอ้อยตั้งเดิม



(ข) เต้าเผาอุณหภูมิสูง

ภาพประกอบ ค7 ถ้ำซันอ้อยเผาซ้ํา ถ้ำซันอ้อยตั้งเดิม และเต้าเผาอุณหภูมิสูง



ภาพประกอบ ค8 ผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในไม้มคอนกรีต Pan mix



ภาพประกอบ ค9 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต



ภาพประกอบ ค10 ป่มจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตในตู้ควบคุมอุณหภูมิ



ภาพประกอบ ค11 เก็บตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตในสภาพอากาศปกติ



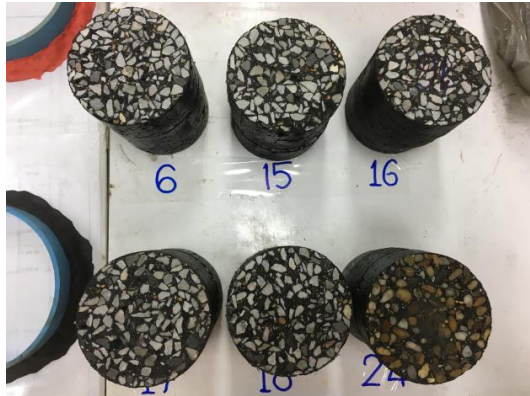
ภาพประกอบ ค12 เปรียบเทียบจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและซีเมนต์คอนกรีต



ภาพประกอบ ค13 เครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ UTM300



ภาพประกอบ ค14 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด



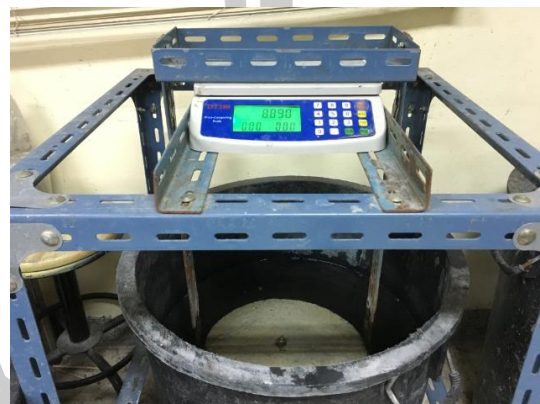
ภาพประกอบ ค15 ตัวอย่างทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ



ภาพประกอบ ค16 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ



ภาพประกอบ ค17 ตัวอย่างทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน



ภาพประกอบ ค18 การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธีการทดสอบไดน้ำ



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายพิพรรณ อินปลัด
วันเกิด	วันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2536
สถานที่เกิด	อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 2 หมู่ที่ 1 ตำบลนาดี อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย รหัสไปรษณีย์ 42120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรีสองรักษ์วิทยา จังหวัดเลย พ.ศ. 2558 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว