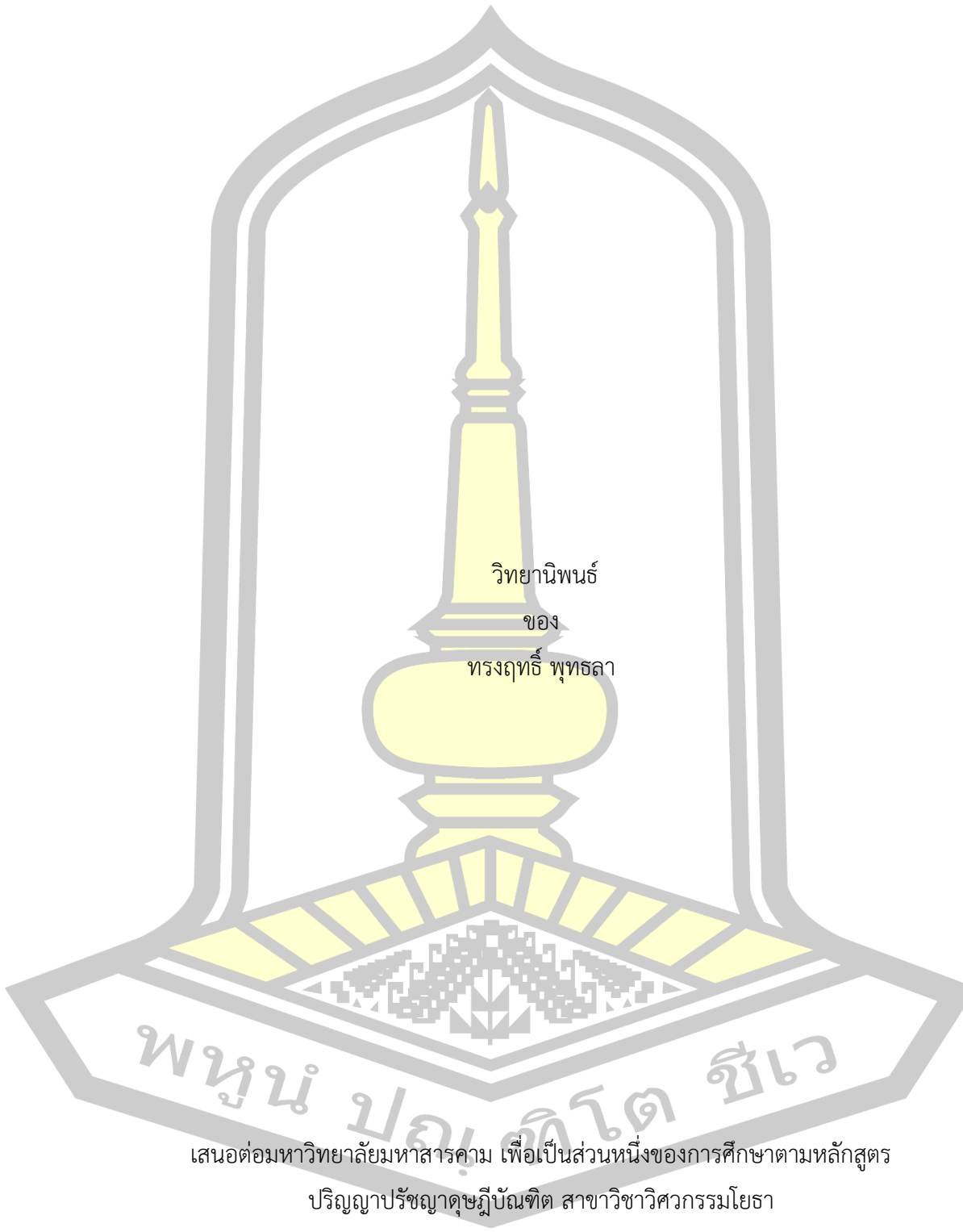
การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยและวัสดุเหลือทิ้ง

วิทยานิพนธ์
ของ
ทรงฤทธิ์ พุทธลา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
กุมภาพันธ์ 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยและวัสดุเหลือทิ้ง



วิทยานิพนธ์

ของ

ทรงฤทธิ์ พุทธลา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

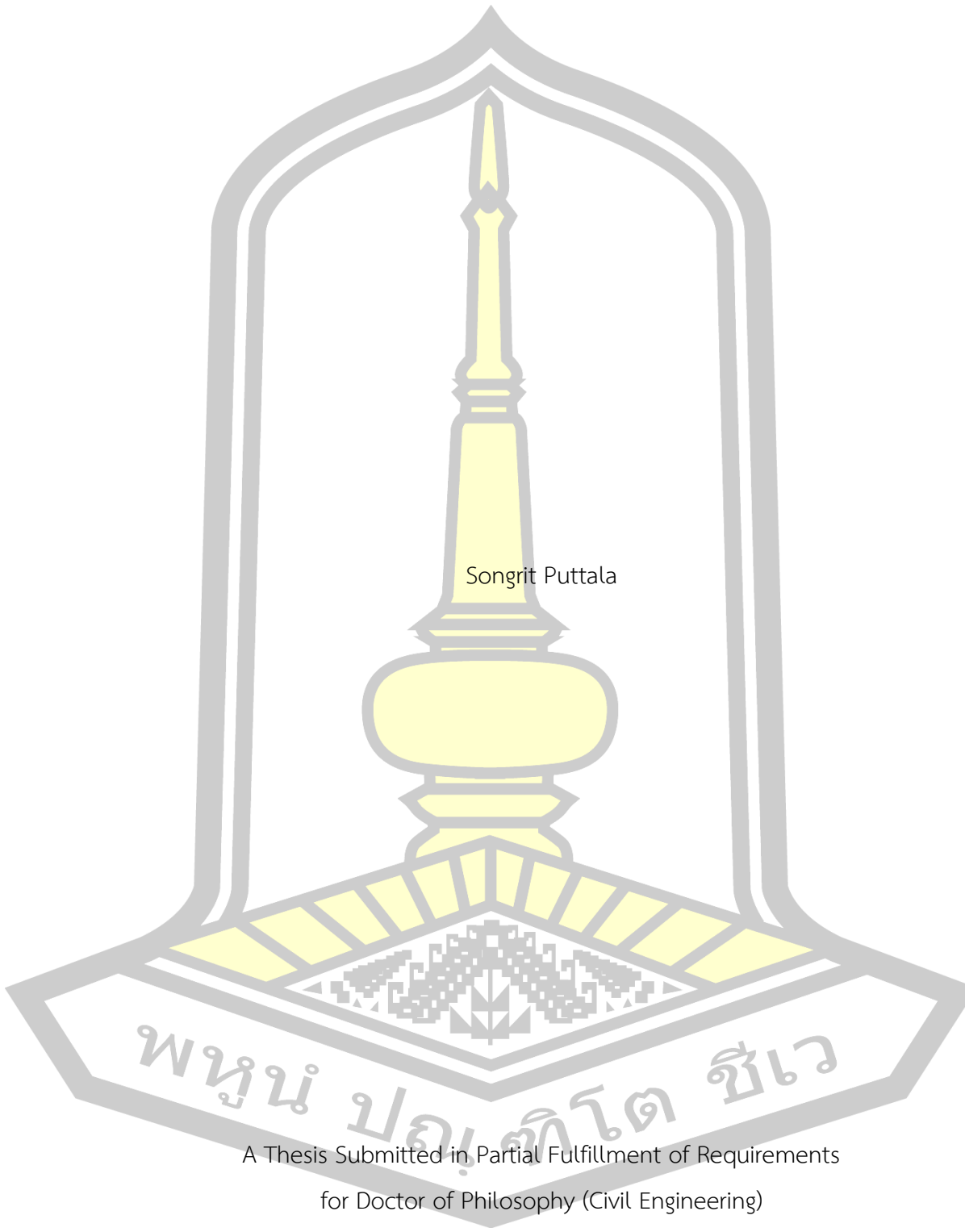
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

กุมภาพันธ์ 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Geopolymer Concrete from Bagasse Ash and Waste Materials

Songrit Puttala



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for Doctor of Philosophy (Civil Engineering)

February 2021

Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายทรงฤทธิ์ พุทธลา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อ. ดร. อธิกา วงค์กวานกลม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รศ. ดร. สหลาภ หอมวุฒิวงศ์)

.....กรรมการ
(รศ. ดร. เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์)

.....กรรมการ
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยและวัสดุเหลือทิ้ง
ผู้วิจัย ทรงฤทธิ์ พุทธลา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สหลาภ หอมวุฒิวงศ์
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2564

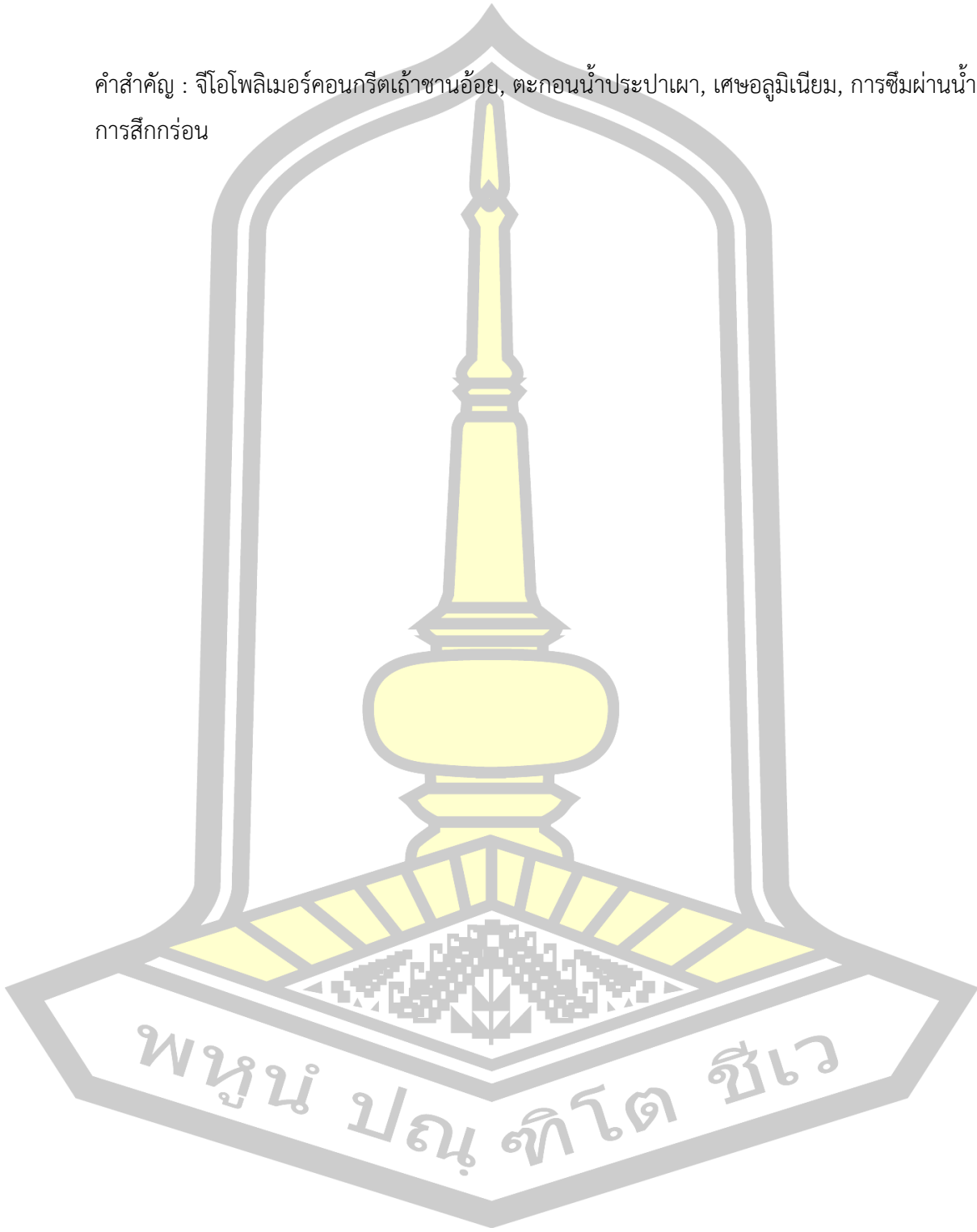
บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย ในด้านการทำงานได้ การก่อตัว การหดตัวเมื่อแห้ง ค่ากำลังอัด อัตราการซึมผ่าน และการสึกกร่อน ทำการปรับปรุงวัสดุตั้งต้นที่เป็นเถ้าชานอ้อยด้วยการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 0-7.5 เศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเถ้าชานอ้อย ปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ด้วยการเติมสารลดน้ำพิเศษประเภท F และ G ในอัตราส่วนร้อยละ 0-5 และเติมน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนักเถ้าชานอ้อย ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล่าร์ อัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 1 อัตราส่วน AL/B อยู่ในช่วง 0.5-0.60 อัตราส่วน CA/AL ในช่วง 5-6 และบ่มที่อุณหภูมิในช่วง 40-100 องศาเซลเซียส ทดสอบการทำงานได้ด้วยการทดสอบค่าการยุบตัวและการก่อตัวของคอนกรีตสด ทดสอบการหดตัวเมื่อแห้ง ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน ส่วนการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำและการสึกกร่อนทดสอบที่อายุ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่าการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยวัสดุอื่นมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย ยกเว้นการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 ให้กำลังอัดสูงสุด ส่วน 0.55 มีความสามารถในการทำงานได้ที่เหมาะสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต การเติมสารลดน้ำพิเศษประเภท F และ G ร้อยละ 1-3 พบว่าส่งผลดีทั้งทางด้านกำลังอัดและการทำงานได้ ส่วนการเติมน้ำมีผลต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยเพียงเล็กน้อย การแทนที่วัสดุทุกชนิดในเถ้าชานอ้อยส่งผลให้การหดตัวเมื่อแห้งลดลงยกเว้นปูนซีเมนต์ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าที่ผลิตจากชานอ้อยมีค่าสูงสุดเมื่อแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ดีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นมีค่ากำลังอัดสูงกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมและจีโอโพลเมอร์ที่ใช้กลุ่มวัสดุผสมอื่น การบ่มที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงและพัฒนาตามอายุทดสอบ สำหรับในกรณีบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่านั้น พบว่ามีการพัฒนากำลังอัดค่อนข้างช้า สำหรับสมบัติด้านความทนทาน ซึ่งพิจารณาในรูปแบบของการซึมผ่านน้ำและการ

ต้านทานการสึกกร่อน พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย, ตะกอนน้ำประปาเผา, เศษอลูมิเนียม, การซึมผ่านน้ำ, การสึกกร่อน



TITLE Development of Geopolymer Concrete from Bagasse Ash and Waste Materials

AUTHOR Songrit Puttala

ADVISORS Associate Professor Sahalaph Homwouttiwong , Ph.D.

DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Civil Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2021

ABSTRACT

The purpose of this research was to develop geopolymers concrete made from bagasse ash, in terms of workability, setting time, drying shrinkage, compressive strength, water permeability and abrasion. Source materials as bagasse ash was improved properties by replacing 0-7.5% of calcined water supply sludge, aluminum scrap at 0.4% and ordinary Portland cement (OPC) at 5% by weight. Workability of geopolymer concrete were observed by adding water, superplasticizers type F and G between 0-5% by weight of bagasse ash. Geopolymer concrete mixed with 10 molars of NaOH, ratio of $NaOH/Na_2SiO_3$ = 1.0, AL/B ratios varied between 0.50-0.60, CA/AL ratios were 5-6 and curing temperature in range of 40-100°C. The workability and setting time of fresh concrete were investigated. Drying shrinkage also observed. The compressive strength was measured at age 3 7 28 and 90 days. For water permeability and abrasion resistance were examined at 28 days.

The results showed that the using of replacing materials affects the duration of both initial and final setting time, except for OPC. The AL/B ratio of 0.50 exhibited the maximum compressive strength. While the AL/B ratio of 0.55 was suitable to produce the geopolymers concrete. The addition of superplasticizers type F and G in range of 1-3% gained both the compressive strength and workability. While adding extra water had an insignificant effect on the geopolymer concrete. Using replacement materials in bagasse ash resulted in a reduction of in drying shrinkage, except for OPC. The replacement with calcined water supply sludge at

7.5% gave the highest compressive strength. However, the replacement with ordinary Portland cement produced the higher compressive strength than the controlled geopolymer concrete and the geopolymer concrete made from blended materials. The curing temperature of 80-100 ℃ produced the high compressive strength increased with the age of samples. The lower temperature curing obtained the low of compressive strength and slowly development as the later age. For durability properties in term of water permeability and abrasion resistance, it reveals that that geopolymer concrete was better than the general concrete.

Keyword : Geopolymer concrete bagasse ash, Calcined waste water sludge, Aluminum scrap, Water permeability, Abrasion resistance

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์.ดร.สหลาภ หอมวุฒิวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความกรุณาในการแนะนำแก้ไขวิทยานิพนธ์ และให้คำปรึกษาตลอดการทำวิจัยซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนเสมอมา ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งในความสำเร็จครั้งนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อธิกา วงค์กวานกลม ที่เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รองศาสตราจารย์.ดร.เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ รองศาสตราจารย์.ดร.กริสน์ ชัยมูล และผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ชัยชาญ โชติถนอม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้เมตตากรุณาแนะนำและชี้แนะแนวทางตลอดจนข้อสังเกตต่างๆ ซึ่งเป็นความรู้ที่ทำให้ผู้เขียนได้นำมาพัฒนางานวิจัย และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ต่างๆ และเจ้าหน้าที่ห้องวิจัย ที่มิได้เอยนามซึ่งได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการและอบรมสั่งสอนต่อผู้เขียนด้วยดีเสมอมาจนทำให้ผู้เขียนทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบคุณ นิสิตปริญญาโท นิสิตปริญญาตรี และกัลยาณมิตรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและส่งเสริมสนับสนุนการทำงานและข้อมูลต่างๆ แก่ผู้เขียนมาโดยตลอดซึ่งเป็นผลทำให้ผู้เขียนสามารถทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จได้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ของผู้เขียนที่ช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆ ด้านด้วยความปรารถนาดียิ่ง และที่สำคัญยิ่งยังเป็นผู้ที่คอยให้กำลังใจเสมอมาโดยตลอด จนส่งผลให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ทรงฤทธิ์ พุทธลา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ซ

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฏ

สารบัญรูปภาพ ..... ฑ

คำอธิบายสัญลักษณ์ย่อ ..... ด

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและปัญหาในการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 5

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 5

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 5

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) 7

2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) 9

2.3 เศษอะลูมิเนียมเหลือทิ้ง (Aluminum waste) 14

2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) 15

2.5 สารผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) 17

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่เป็นสารตั้งต้น และสารผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 17

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 31

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย 31

3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย 31
3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 32
3.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 32
3.5 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....33
3.6 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้ง 33
3.7 วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....34
3.8 การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้านต่าง ๆ 36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....48
4.1 สมบัติของเถ้าชานอ้อยและวัสดุอื่นที่ผสมเถ้าชานอ้อย.....48
4.2 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 54
4.3 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ 58
4.4 การหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าชานอ้อย 63
4.5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย 64
4.6 การซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย 77
4.7 การ สึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย.....78
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ 80
5.1 สรุปผลการทดสอบ 80
5.2 ข้อเสนอแนะ 81
บรรณานุกรม.....82
ภาคผนวก.....92
ภาคผนวก ก สมบัติพื้นฐานของวัสดุ 93
ภาคผนวก ข กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย.....96
ภาคผนวก ค การซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย.....107

ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณค่าการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย.....110

ภาคผนวก จ การสึกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย 112

ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการคำนวณค่าการสึกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย.....115

ภาคผนวก ช รูปถ่ายการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย.....117

ประวัติผู้เขียน 125

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย 10

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน 12

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนน้ำประปา และตะกอนน้ำประปาเผา 14

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด AL 6063 15

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 15

ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 42

ตารางที่ 7 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม บ่มที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส 43

ตารางที่ 8 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา บ่มที่อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียส 43

ตารางที่ 9 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บ่มที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส 44

ตารางที่ 10 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส... 44

ตารางที่ 11 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ควบคุมสำหรับทดสอบการสึกกร่อน และการซึมผ่านน้ำ บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 44

ตารางที่ 12 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยสำหรับทดสอบการหดตัวเมื่อแห้ง บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 45

ตารางที่ 13 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เถ้าชานอ้อยสำหรับทดสอบการก่อตัว ที่บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 45

ตารางที่ 14 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับมวลรวมหยาบต่างชนิด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 45

ตารางที่ 15 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับทดสอบค่าการยุบตัว บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 46

ตารางที่ 16 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผา 48

ตารางที่ 17 การกระจายตัวของอนุภาคเถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา 51

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 59

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ ควบคุม 60

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ แทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5 61

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ แทนที่ด้วย 62

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบค่าการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าชานอ้อย 64

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 66

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม 68

ตารางที่ 25 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 แปรผันอุณหภูมิ และมวลรวมหยาบ 70

ตารางที่ 26 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 แปรผันอุณหภูมิ 72

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานแทนที่ด้วยวัสดุที่แตกต่างกันและบ่มที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 73

ตารางที่ 28 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่เพิ่มสารลดน้ำพิเศษและน้ำ 75

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำที่แรงดัน 1 บาร์ ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยคอนกรีต ที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 เทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่อัตราส่วน W/C เทากับ 0.55 78

ตารางที่ 30 ผลการทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้านชานอ้อย 79

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 สัดส่วนของการใช้ชานอ้อยตลอดทั้งปี....2

รูปที่ 2 กองเศษวัสดุเถ้าชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากการผลิตไฟฟ้า....3

รูปที่ 3 รูปแบบโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์....8

รูปที่ 4 ปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันของดินขาวในสารอัลคาไลน์....9

รูปที่ 5 ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคโดย SEM ของเถ้าชานอ้อย....11

รูปที่ 6 ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคโดย SEM ของเถ้าถ่านหิน....12

รูปที่ 7 รูปจาก SEM ของ (a): แบบไม่เผา WTR (b): WTR เผาที่ 800 °C (c): WTR-based geopolymer ไม่มี EPS และ (d): WTR-based geopolymers กับ 50% EPS. 13

รูปที่ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคโดย SEM ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1....16

รูปที่ 9 ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา....34

รูปที่ 10 ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียม....35

รูปที่ 11 ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์....36

รูปที่ 12 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบ UTM....37

รูปที่ 13 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต....38

รูปที่ 14 ชุดเครื่องมือการทดสอบการซึมผ่านน้ำ....39

รูปที่ 15 ภาพตัดรายละเอียดชุดทดสอบการขัดสี....40

รูปที่ 16 ชุดทดสอบการการขัดสี....41

รูปที่ 17 ชุดทดสอบหดตัวเมื่อแห้ง ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์....41

รูปที่ 18 การทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์....42

รูปที่ 19 โปรแกรมการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้ง....47

รูปที่ 20 องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าชานอ้อย....49

รูปที่ 21 องค์ประกอบทางแร่ของตะกอนน้ำประปาเผา 600 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง 49

รูปที่ 22 ขนาดคละของทราย.....50

รูปที่ 23 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าชานอ้อย.....51

รูปที่ 24 การการกระจายตัวของขนาดอนุภาคตะกอนน้ำประปาเผา.....51

รูปที่ 25 พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของเถ้าชานอ้อย.....52

รูปที่ 26 พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตะกอนน้ำประปาเผา 600˚C 2 ชั่วโมง 53

รูปที่ 27 ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยกับการแทนที่วัสดุตั้งต้นแตกต่างกัน 55

รูปที่ 28 ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยกับการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผา อัตราส่วนร้อยละที่แตกต่างกัน.....55

รูปที่ 29 ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปากับมวลรวมหยาบต่างชนิดกัน 56

รูปที่ 30 ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียมกับมวลรวมหยาบต่างชนิด 56

รูปที่ 31 ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยกับร้อยละของสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน 58

รูปที่ 32 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เถ้าชานอ้อยที่แทนที่วัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน....63

รูปที่ 33 การหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ถ้าชานอ้อยที่แทนที่วัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน....64

รูปที่ 34 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย).....66

รูปที่ 35 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด B (หินบะซอลต์โพรงข่าย).....67

รูปที่ 36 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5 บ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....67

รูปที่ 37 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่เศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0.4 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย) 69

รูปที่ 38 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่เศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0.4 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด C (หินกรวด).....70

รูปที่ 39 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่เศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0.4 บ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....71

รูปที่ 40 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 บ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 73

รูปที่ 41 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่วัสดุตั้งต้นแตกต่างกัน เทียบกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 74

รูปที่ 42 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยใช้สารผสมเพิ่มต่างชนิดกันในอัตราส่วนร้อยละ 1 ของปริมาณเถ้าชานอ้อย 76

รูปที่ 43 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยใช้สารผสมเพิ่มต่างชนิดกันในอัตราส่วนร้อยละ 3 ของปริมาณเถ้าชานอ้อย 76

รูปที่ 44 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยใช้สารผสมเพิ่มต่างชนิดกันในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของปริมาณเถ้าชานอ้อย 77

รูปที่ 45 การสึกกร่อนที่ปรากฏของคอนกรีตหลังการทดสอบ (a) คอนกรีตทั่วไป และ (b) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย.....78

คำอธิบายสัญลักษณ์ย่อ

BA	= เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash)
WWS	= ตะกอนน้ำประปาเผา (Wastewater sludge)
NaOH	= โซเดียมไฮดรอกไซด์
Na_2SiO_3	= โซเดียมซิลิเกต
AL/B	= อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น (Alkali to Binders)
CA/AL	= อัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อสารละลาย (Coarse aggregate to Alkali)
SiO_2/Al_2O_3	= อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา (Silica to Alumina)
ALU	= เศษอลูมิเนียม (Aluminum scrap)
OPC	= ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary plotland cement)
A	= หินปูนย่อย (Lime stone)
B	= หินบะซอลต์โพรงข่าย (Vasicula basalt)
C	= กรวดแม่น้ำ (Gravel)
GPC	= จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopoymer concrete)
SSD	= ตัวอย่างที่ถูกเตรียมในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Sutural Surface dry)
SP	= สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizers)
Control	= จีโอโพลิเมอร์ควบคุม
CA	= มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)
Temp	= อุณหภูมิ (Temperature)

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 1
บทนำ

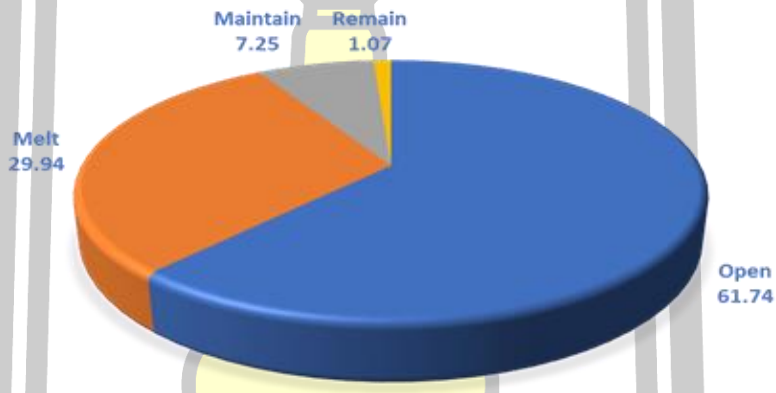
1.1 ความเป็นมาและปัญหาในการวิจัย

ปัจจุบันปัญหาโลกร้อน (Global warming) และปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาหลักที่สำคัญที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้วัตถุดิบทางธรรมชาติมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น ในขบวนการของอุตสาหกรรมเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อภาวะโลกร้อน และปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมาก อุตสาหกรรมการก่อสร้างมีความต้องการปูนซีเมนต์มากขึ้นตามความต้องการที่เพิ่มขึ้นของการเจริญเติมโตของเมือง คอนกรีตเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่ใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติมาผลิต และขบวนการผลิตคอนกรีตนี้เองเป็นต้นเหตุของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านอื่นๆ อีกทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ที่ผลิตเม็ดปูน 1 ตัน จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกมาประมาณ 0.90 ตัน และอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์นี้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คิดเป็นร้อยละ 5 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก (Mahasenan et al., 2003)

คาร์บอน ฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) คือ การคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากขบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ต้นทางการผลิตจนถึงวิธีการจัดการกับเศษซากของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยใช้วิธีคำนวณออกมาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เทียบเท่าต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการคิดค้นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมก่อสร้างจึงมีนักวิจัยที่คิดค้นวัสดุมาทดแทนปูนซีเมนต์ และการผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ เช่น ปอซโซลานคอนกรีต (Pozzolanic concrete) และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete) เป็นต้น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าประมาณร้อยละ 9 ของคอนกรีตธรรมดา (Turner & Collins, 2013) แต่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ก็ยังคงเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการ เช่น เถ้าถ่านหิน (Coal fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) และเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) เป็นต้น

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตน้ำตาลในช่วงฤดูการผลิต 2560/2561 มีผลผลิตน้ำตาล 14.7 ล้านตัน ซึ่งถือเป็นผู้ผลิตรายใหญ่สุดของภูมิภาคตะวันออก ในช่วงฤดูการปี 2561/2562 ไทยมีจำนวนปริมาณของอ้อยอยู่ที่ 131 ล้านตัน ไทยผลิตน้ำตาลและส่งออกเป็นอันดับ 2 ของโลกในปี 2561/2562 (สนอ. รายงานประจำปี 2561, 2561) ในขบวนการผลิตน้ำตาลเมื่อทำการหีบอ้อยแล้ว

จะเหลือชานอ้อยร้อยละ 27 ถึง 30 ของปริมาณอ้อยสดที่ถูกหีบเอาน้ำอ้อยออกชานอ้อยเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในช่วงฤดูหีบจะใช้ชานอ้อยร้อยละ 61.74 และช่วงละลายน้ำตาลจะใช้ชานอ้อยร้อยละ 29.94 ส่วนช่วงซ่อมบำรุงรักษาจะใช้ชานอ้อยร้อยละ 7.25 และปริมาณชานอ้อยที่คงค้างในโรงงานมีร้อยละ 1.07 ดังแสดงในรูปที่ 1 และเมื่อนำชานอ้อยมาเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วจะเหลือวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักชานอ้อยหรือคิดเป็นประมาณ 812,200 ตันต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปทิ้งหรือถมที่ บางส่วนเกษตรกรจะนำไปใส่แปลงเกษตรเพื่อเป็นปุ๋ย และส่วนใหญ่จะนำไปปรับสภาพดินบริเวณที่จะทำการเพาะปลูกที่มีสภาพเป็นกรด ซึ่งเถ้าชานอ้อยเหล่านี้มีสมบัติเป็นวัสดปอซโซลานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้



รูปที่ 1 *สัดส่วนของการใช้ชานอ้อยตลอดทั้งปี*

ที่มา: *http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2331*

สืบค้นเมื่อวันที่: *10 มีนาคม 2563*

การนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทางการเกษตรมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นจะช่วยลดปัญหาทางด้านสภาพแวดล้อม และยังคงเป็นวัสดุทางเลือกที่กำลังนิยมในปัจจุบัน ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการนำเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) มาใช้ประโยชน์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำตาลแล้วนำชานอ้อยไปเผาเพื่อนำพลังงานจากการเผาไปใช้งาน แล้วจะเหลือเถ้าชานอ้อยที่เกิดจากการเผาไหม้จำนวนมาก ซึ่งเถ้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐานที่สามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นของการผลิตวัสดุยึดประสานที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น จีโอโพลิเมอร์นั้นมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น มีกำลังอัดสูง

ช่วงต้นอายุ อัตราซึมผ่านน้ำต่ำ อัตราหดตัวต่ำ ทนไฟสูง ทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตสูง และทนต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดีเป็นต้น (Duxson et al., 2007)

รูปที่ 2 *กองเศษวัสดุเถ้าชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากการผลิตไฟฟ้า*

เถ้าถ่านหิน ตามคำนิยามของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI 226.3R-87, 1987) คือ สารตกค้างที่มีความละเอียดที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้ของวัตถุดิบหรือเถ้าถ่านหิน และถูกขนส่งโดยก๊าซไอเสียที่เกิดจากโซนการเผาไหม้ไปยังระบบกำจัดอนุภาค (Concrete, n.d.) เถ้าถ่านหิน ถูกกำจัดจากก๊าซการเผาไหม้โดยระบบกำจัดฝุ่นไม่ว่าจะโดยกลไกของระบบเองหรือโดยการใช้ตัวจับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตก่อนที่จะถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ เถ้าถ่านหินมีขนาดอนุภาคที่มีลักษณะเป็นรูปร่างกลม มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนขาว ช่วงขนาดของเถ้าถ่านหินมีขนาดน้อยกว่า 1 ไมครอน แต่ไม่เกิน 150 ไมครอน ประเภทและปริมาณสัมพัทธ์ของสสารที่ไม่ติดไฟในเถ้าถ่านหินเป็นตัวกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบไปด้วยออกไซด์ ดังนี้ ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยอิทธิพลหลักขององค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน มาจากประเภทของถ่านหิน ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นกับวิธีการเผาไหม้ แหล่งของถ่านหิน และรูปร่างของอนุภาค องค์ประกอบทางเคมีที่มีความแปรปรวนในช่วงที่กว้าง ชี้ให้เห็นถึงความแปรปรวนของช่วงที่กว้างนั้นเกิดจากการใช้ถ่านหินในโรงผลิตไฟฟ้าทั่วโลก (Malhotra & Ramezanianpour, 1994) เถ้าถ่านหินถูกนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถึงร้อยละ 60 และช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตให้ดีขึ้น (Malhotra, 2002)

ในปี 1999 Davidovits เสนอสารละลายอัลคาไลน์ที่สามารถใช้ในการทำปฏิกิริยากับซิลิกอน (Si) อลูมิเนียม (Al) ในวัสดุต้นแหล่งหรือวัสดุผลพลอยได้ เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบเพื่อผลิตเป็นสารยึดเกาะ เพราะว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้คือกระบวนการโพลิเมอไรเซชันซึ่งเป็นที่ทำให้เกิดการยึดเกาะ (Davidovits, 1999) ที่ผ่านมา เถ้าถ่านหิน ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นหลัก เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่มีจำนวนของซิลิกอน และอลูมิเนียม ที่สูงจึงมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งพบว่าให้กำลังอัดสูง มีความคงทนที่ดี และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีมูลค่าสูงขึ้นเป็นเพราะว่าถ่านหินสามารถนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตได้โดยตรง

เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุที่มีอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศ ซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตได้ และยังมีการศึกษาเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งในปัจจุบันนั้นยังมีไม่มากนัก โดยในช่วงปี 2016 Saloma และคณะ ได้ทำการศึกษาผลความเข้มข้นของ NaOH ที่มีต่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้า ช่วงความเข้มข้น 8 ถึง 16 โมลาร์ โดยมีอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต 1.0 ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าโมลาร์ต่ำจะทำให้ค่าการยุบตัวสูงกว่าความเข้มข้นที่โมลาร์สูง ในทางกลับกันกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโมลาร์ที่สูงขึ้นสูงสุดเท่ากับ 20.44 เมกะปาสคาล และพบว่าการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์จะลดลงเมื่อโมลาร์สูงขึ้น ส่วนกำลังอัดจะพัฒนาตามอายุของตัวอย่าง ส่วนในประเทศไทยก็มีผู้วิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยแต่ยังไม่มากนัก จากข้อมูลต่างๆ ที่ทำการสืบค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยนั้นจะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่นั้นยังคงมีกำลังอัดที่ต่ำและยังคงใช้อุณหภูมิที่สูงในการบ่ม โดยส่วนใหญ่ยังคงเป็นงานวิจัยที่เป็นมอร์ต้าร์ ซึ่งยังคงเป็นช่องว่างที่สามารถนำไปพัฒนาเพื่อผลิตเป็นคอนกรีต และลดอุณหภูมิการบ่มลง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการศึกษาเพื่อการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยให้มีกำลังสูงขึ้น ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย โดยแทนที่ด้วย ตะกอนน้ำประปา เศษอลูมิเนียม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 อัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น อัตราส่วนของมวลรวมหยาบต่อสารละลาย อิทธิพลของสารผสมเพิ่มที่มีต่อความสามารถในการทำงานได้ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และความคงทนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยทำการทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อย ได้แก่ กำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการสึกกร่อน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปปรับใช้เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และยังสามารถพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอนาคตต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยให้มีกำลังสูงขึ้น และใช้วัสดุอื่นมาร่วมเป็นวัสดุตั้งต้นกับเถ้าชานอ้อยในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของ อัตราส่วน AL/B อุณหภูมิการบ่ม ชนิดมวลรวมหยาบ และสารผสมเพิ่ม ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่มีต่อสมบัติด้าน การทำงานได้ การหดตัวเมื่อแห้ง กำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการสึกกร่อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการวิจัย ได้แก่ เถ้าชานอ้อยจากโรงน้ำตาลวังขนาย ต.แก้งแก อ.โกสุมพิสัย จ.มหาสารคาม เศษอะลูมิเนียมจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตะกอนน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปา อำเภอเมือง มหาสารคาม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

1.3.2 ใช้มวลรวมหยาบ 3 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อย (A) หินบะซอลต์โพรงข่าย (B) และกรวดแม่น้ำ (C) ขนาด 3/8” เตรียมในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง อัตราส่วน CA/AL อยู่ในช่วง 5 ถึง 6

1.3.3 ทรายแม่น้ำจากแหล่งน้ำพองที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.5 ถึง 2.9 เตรียมในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

1.3.4 อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) อยู่ในช่วง 0.50 ถึง 0.60

1.3.5 อัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3/NaOH) เท่ากับ 1

1.3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มอยู่ในช่วง 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

1.3.7 ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกำหนดไว้ที่ 50 มิลลิเมตร ± 25 มิลลิเมตร

1.3.8 สารผสมเพิ่มชนิด Superplasticizers ประเภท F และ G ร้อยละ 1 ถึง 5

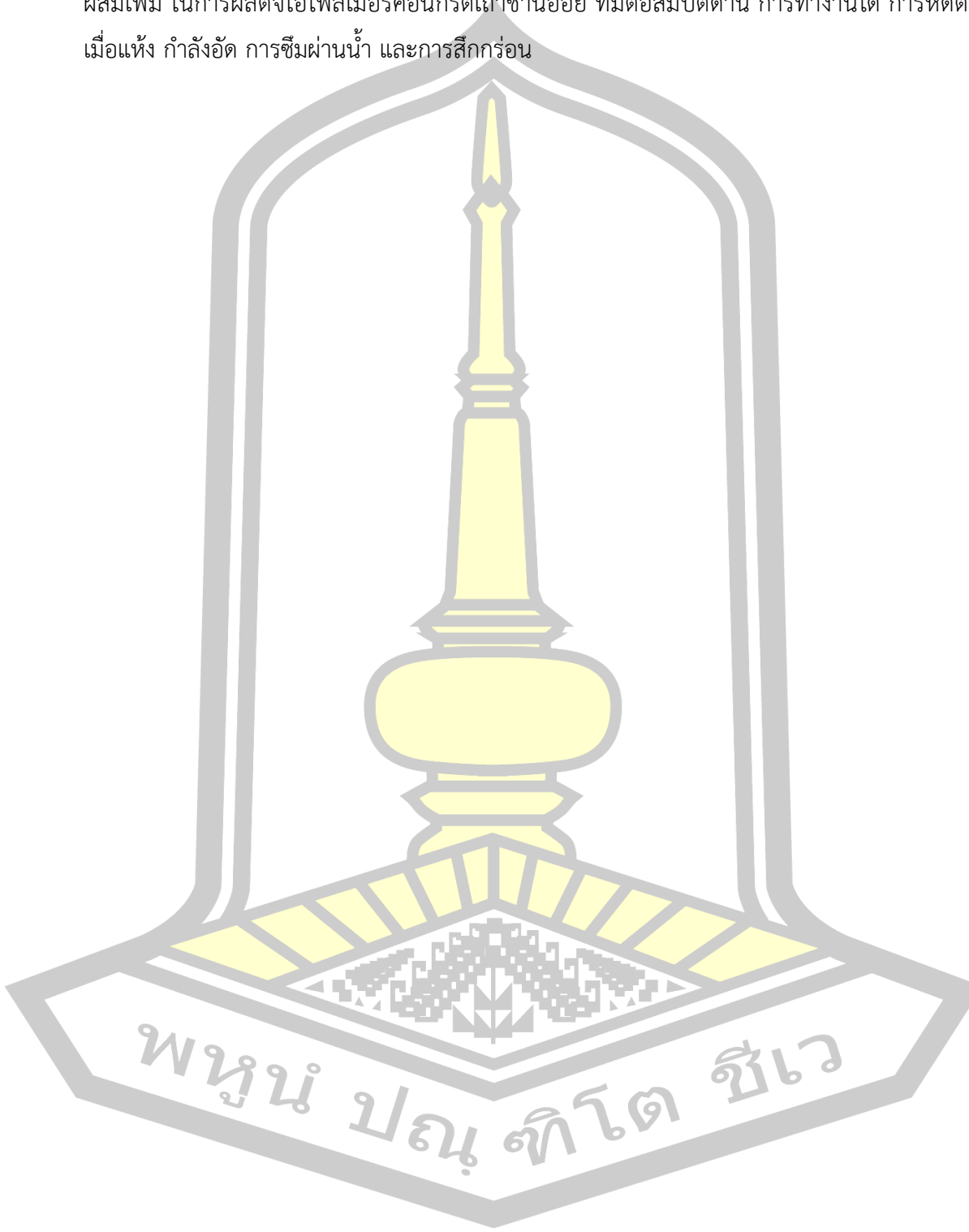
1.3.9 ทดสอบความสามารถในการทำงานได้ด้วยวิธีหาค่าการยุบตัว ทดสอบการก่อตัว ทดสอบการหดตัวเมื่อแห้ง ทดสอบกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและการศึกกร่อน ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อย

1.3.10 ทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน ส่วนการซึมผ่านน้ำและการศึกกร่อน ทดสอบที่อายุตัวอย่าง 28 วัน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยให้มีกำลังสูงขึ้น และใช้วัสดุอื่นมาร่วมเป็นวัสดุตั้งต้นกับเถ้าชานอ้อยในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

1.4.2 ทราบถึงอิทธิพลของ อัตราส่วน AL/B อุณหภูมิการบ่ม ชนิดมวลรวมหยาบ และสารผสมเพิ่ม ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่มีต่อสมบัติด้าน การทำงานได้ การหดตัวเมื่อแห้ง กำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการสึกกร่อน



บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการพัฒนาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ด้านต่างๆ ได้แก่ กำลังอัด ความทนทาน และอุณหภูมิในการบ่ม โดยมีรายละเอียดเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

2.1.1 ความหมายของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ คือวัสดุที่มีโครงสร้างที่เป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) แบบ 3 มิติ มีส่วนผสมของอะลูมิโนซิลิเกต เป็นวัสดุที่พัฒนาเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จีโอโพลิเมอร์มีการค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสหภาพโซเวียต ชื่อ Glukhovsky ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1987 วิศวกรเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ Davidovits ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ และได้มีการพัฒนาวัสดุโพลิเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic polymer) โดยใช้ดินขาวที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นส่วนประกอบหลักในการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ถึง 150 องศาเซลเซียส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจนเกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดเซชัน (Polycondensation) (วิเชียร ชาลี, 2559) ซึ่งในปัจจุบันนักวิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าการผสมวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ในอุณหภูมิปกติ และได้ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์มีสูตรทางเคมีพื้นฐาน (Davidovits, 2008) แสดงในสมการที่ 2.1

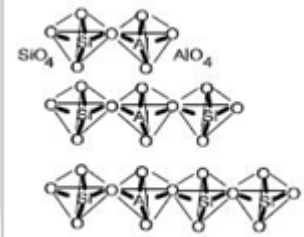
$$M_n[-(\text{Si-O}_2)_Z - \text{AlO}_2 -]_n * \text{wH}_2\text{O} \qquad (2.1)$$

เมื่อ M คือ ธาตุอัลคาไลน์ (alkaline)
Z คือ จำนวนของโมเลกุลของ ซิลิกา (SiO_2) เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
n คือ สายโซ่ของจำนวนโมเลกุลที่ต่อกัน (polycondensation)
w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ และ
- คือ การยึดเกาะกันของพันธะ (bonding)

2.1.2 โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ เกิดจากโมเลกุลของ Si^{+4} และ Al^{+3} จับตัวกันเกิดพันธะโคออดิเนตกับออกซิเจนแบบ 4 แขน เมื่อทำปฏิกิริยาไประยะหนึ่งจะเกิดการจับตัวกันเป็นโครงสร้างโพลิ

เมอร์ ที่เรียกว่าปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน ของซิลิกา และอะลูมินา เป็นโซ่โมเลกุลด้วยพันธะโควาเลน์ (Covalant bond) จะมีโครงสร้างเป็นลักษณะคล้ายกับปิรามิดสี่เหลี่ยมด้านเท่า โดยสามารถแบ่งประเภทของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ออกเป็น 3 ประเภท (Songpiriyakij et al., 2010) คือ โพลิไซอะเลต (Polysialate) โพลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate siloxo) และโพลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate disiloxo) ดังแสดงในรูปที่ 3

Types of species	Abbreviations
1. Poly(sialate)	
R_n–(–Si–O–Al–O–)$_n$–	R-PS
2. Poly(sialate-siloxo-)	
R_n–(–Si–O–Al–O–Si–O–)$_n$–	R-PSS
3. Poly(sialate-disiloxo-)	
R_n–(–Si–O–Al–O–Si–O–Si–O-)$_n$–	R-PSDS



รูปที่ 3 *รูปแบบโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์*
ที่มา: (Davidovits, 1999)

2.1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ ปฏิกิริยาการที่เกิดจากสารจีโอโพลิ-เมอร์มีอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีลักษณะอยู่ในรูปแบบอสัณฐาน และมีรูปแบบกึ่งผลึก ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ และเกิดการก่อตัวแล้วแข็งตัวสามารถรับแรงอัดได้ดี ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน (Duxson et al., 2007) ดังนี้

1. ขั้นตอนการชะละลาย (Dissolution) โดยขั้นตอนนี้เกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นที่มีอะลูมิโนซิลิเกต เช่น เถ้าชานอ้อย เถ้าถ่านหิน เป็นต้น ถูกนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะเกิดการชะละลายเอา อะลูมิเนต (Al) และซิลิเกต (Si) ที่เป็นสารประกอบหลักในสารตั้งต้นออกมาทำปฏิกิริยาเคมี

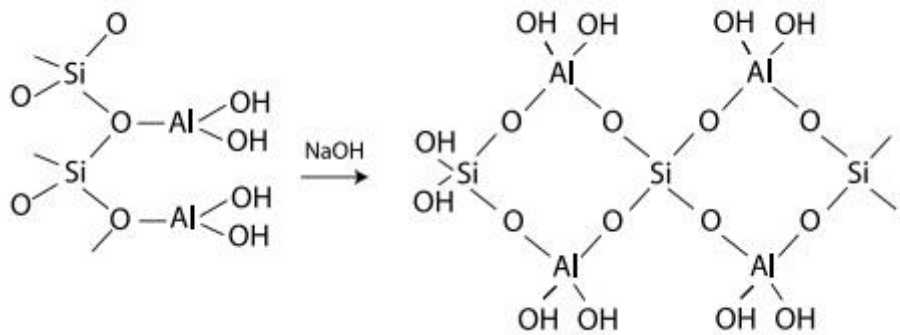
2. ขั้นตอนของสภาวะสมดุลจำเพาะ (Speciation equilibrium) เมื่ออนุภาคของแข็งที่มีการชะละลายบนพื้นผิวทำให้อะลูมิเนต และซิลิเกตถูกปลดปล่อยเป็นอิสระ ที่อยู่ในรูปของโมโนเมอร์ โดยจะเกิดการจัดเรียงตัวที่มีความซับซ้อนของซิลิเกตอลมิเนต และอะลูมิโนซิลิเกต และอยู่ในสภาวะสมดุลจำเพาะ ในขั้นตอนนี้น้ำจะถูกขับออกจากเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ในช่วงของการบ่มและช่วงแห้งตัว ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะยังคงมีน้ำเหลืออยู่ในโพลงขนาดเล็กที่มีความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous nano pore) ซึ่งไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

3. ขั้นตอนการก่อตัวเป็นเจล (Gelation) เมื่อมีการชะละลายของอะลูมิโนซิลิเกตที่ค่าความเป็นด่างสูงอย่างรวดเร็ว จะเกิดการอิ่มตัวอย่างมากของสารละลายอะลูมิโนซิลิเกต

(Suppersaturated aluminosilicate solution) จนสารละลายเข้มข้นขึ้นอยู่ในรูปเจล (Gel) ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) อยู่ในรูปของสภาวะที่มีน้ำเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่โดยมีการควบแน่น ปฏิกิริยานี้จะมีการปล่อยน้ำที่สะสมในช่วงการชะละลาย น้ำที่เหลือจะอยู่ในโพลงเจล ซึ่งมีส่วนประกอบของอะลูมิโนซิลิเกตและน้ำ

4. ขั้นตอนการจัดเรียงตัวของโครงสร้างใหม่ (Reorganization) ปฏิกิริยายังคงดำเนินไปเรื่อยๆ หลังจากเกิดเจลมีการจัดเรียงตัวและเกิดโครงสร้างใหม่

5. ขั้นตอนการจัดเรียงตัวแบบลูกโซ่และการแข็งตัว (Polymerization chain and Hardening) เกิดการเชื่อมโยงของโครงข่ายมากขึ้น จนเกิดเป็นโครงข่ายแบบ 3 มิติ เรียกว่า จีโอโพลิ-เมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 *ปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันของดินขาวในสารอัลคาไลน์*
ที่มา: (Davidovits, 2015)

2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)

2.2.1 ความหมายของวัสดุปอซโซลาน เป็นวัสดุที่มีซิลิกา และอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยปกติแล้ววัสดุปอซโซลานนั้นไม่มีความสามารถที่เป็นวัสดุยึดประสานได้ แต่เมื่อวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีความชื้นหรือน้ำมากเพียงพอ ก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารที่มีส่วนประกอบของสมบัติการยึดประสานคล้ายซีเมนต์ (ASTM C168, 2003) ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุน และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตคอนกรีต วัสดุปอซโซลานยังช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านต่างๆ ของคอนกรีต ตามแต่ละชนิดของวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้งาน ในปัจจุบันนั้นวัสดุปอซโซลานถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นหรือใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 9 ชนิด (Davidovits, 2008) ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต ดินขาว ดินขาวเผา แคลเซียม หิน ซิลิกา ฟอสเฟต สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และเถ้าถ่านหิน เป็นต้น

2.2.2 ประเภทของวัสดุปอซโซลานมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย เถ้าหนัก ดินขาว ดินขาวเผา ซิลิกาฟูม ตะกรันเถาเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2556) และยังมีวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นอีก เช่น ตะกอนน้ำประปา เศษอะลูมิเนียม เถ้าภูเขาไฟ และเถ้าชีวะมวล เป็นต้น สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จะนำวัสดุเหลือทิ้ง ได้แก่ เถ้าชานอ้อย ตะกอนน้ำประปา และเศษอะลูมิเนียม มาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash)

เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากขบวนการผลิตน้ำตาล เมื่อบีบเอาน้ำจากต้นอ้อยแล้วจะได้กากอ้อยที่เรียกว่าชานอ้อย จากนั้นก็นำชานอ้อยไปเผาเป็นเชื่อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้ภายในโรงงานและไฟฟ้าที่เหลือใช้จะนำไปขายให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นประเทศที่ปลูกอ้อยเป็นจำนวนมาก ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตน้ำตาลในช่วงฤดูการผลิต 2560/2561 มีผลผลิตน้ำตาล 14.7 ล้านตัน ถือเป็นผู้ผลิตรายใหญ่สุดของภูมิภาคตะวันออก ในช่วงฤดูการปี 2561/2562 มีจำนวนปริมาณของอ้อยอยู่ที่ 131 ล้านตัน ผลิตน้ำตาลและส่งออกเป็นอันดับ 2 ของโลกในปี 2561/2562 ในขบวนการผลิตน้ำตาลนี้เมื่อทำการหีบอ้อยแล้วจะเหลือชานอ้อยร้อยละ 27 ถึง 30 ของปริมาณอ้อยสดที่ถูกหีบเอาน้ำอ้อยออก เศษของชานอ้อยเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในช่วงฤดูหีบจะใช้ชานอ้อยร้อยละ 61.74 และช่วงละลายน้ำตาลจะใช้ชานอ้อยร้อยละ 29.94 ส่วนช่วงซ่อมบำรุงรักษาจะใช้ชานอ้อยร้อยละ 7.25 และปริมาณชานอ้อยที่คงค้างในโรงงานมีร้อยละ 1.07 และเมื่อนำชานอ้อยมาเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วจะเหลือวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นเถ้าชานอ้อยประมาณร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักชานอ้อยหรือคิดเป็นประมาณ 812,200 ตันต่อปี ซึ่งเถ้าเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากขบวนการผลิตและมีการนำมาใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น นำมาถมที่ และทางการเกษตรนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินของแปลงอ้อยหรือด้านการเกษตรอื่น ๆ เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2556)

ตารางที่ 1 *องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย*

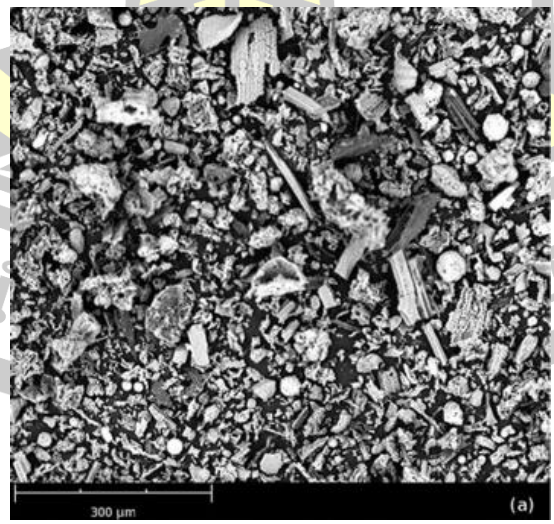
Composition (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
Bagasse ash (Low LOI)	76.80	4.40	8.04	5.44	0.94	0.09	3.28
Bagasse ash (High LOI)	67.10	5.69	2.54	2.93	0.45	0.03	20.36

ที่มา: (คาวี มนทการติวงศ์, 2458)

สมบัติทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเถ้าชานอ้อย โดยองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าชานอ้อยมี SiO_2 ร้อยละ 65 ถึง 75 มีปริมาณ SO_3 ต่ำ แต่มีปริมาณ LOI สูงถึงร้อยละ 20 ถึง 30 และหากเถ้าชานอ้อยมีปริมาณ LOI ที่สูง มักจะมี SiO_2 ต่ำกว่าอ้อยเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ต่ำ (คาวี มนทการติวงศ์, 2458) ดังแสดงในตาราง 1 แต่ค่า LOI ที่สูงของเถ้าชานอ้อยนั้นไม่ได้เป็นคาร์บอน เถ้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นสารประกอบอื่นที่เกิดการสลายตัวภายใต้การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งผลการทดสอบค่า LOI นั้นใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 750 องศาเซลเซียส ลักษณะทางกายภาพของเถ้าชานอ้อยมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีความไม่แน่นนอน มีความพรุนสูง และมีผิวขรุขระ ซึ่งมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอน แสดงในรูปที่ 5 เมื่อนำเถ้าชานอ้อยมาบดและร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 325 ให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นอนุภาคจะมีความคล้ายกันกับเถ้าแกลบ มีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยก่อนบด

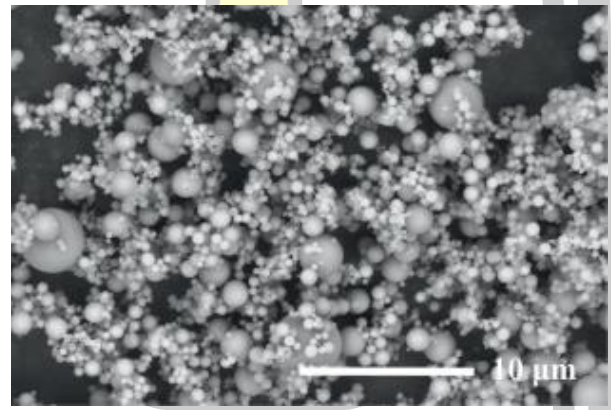
2. เถ้าถ่านหิน (Coal Fly Ash)

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุที่เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า หลังจากเถ้าถ่านหินถูกเผาเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตไฟฟ้าแล้ว จะมีกากที่ประกอบด้วยเถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยประมาณร้อยละ 80 และร้อยละ 20 เป็นเถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2556) โรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในปี พ.ศ. 2559 ประมาณ 1.70 ล้านตัน โดยเมื่อคิดเป็นร้อยละของเถ้าถ่านหินประมาณ 1.36 ล้านตัน (http://maemoh.egat.com/index.php/tec) ปัจจุบันเถ้าถ่านหินจากแหล่งโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้ผสมเพื่อแทนที่ปริมาณของปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อลดต้นทุน และเพิ่มสมบัติด้านอื่นๆ ของคอนกรีต



รูปที่ 5 *ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคโดย SEM ของเถ้าชานอ้อย*
ที่มา: (Arif et al., 2017)

สมบัติทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน ซึ่งเถ้าถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C618 คือ Class F และ Class C โดยองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินมีปริมาณสมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมและมีผิวเรียบ ความละเอียดของเถ้าถ่านลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม โดยทดสอบตามวิธีของเบลน (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2453) เถ้าถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงด้านใน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ถูกกักไว้ภายใน และยังมีเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคเล็กๆ ขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน โดยความถ่วงจำเพาะเถ้าถ่านหินอยู่ในช่วง 2.00 ถึง 2.20 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2556) มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อดูจากภาพขยายด้วยกล้อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 *ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคโดย SEM ของเถ้าถ่านหิน*
ที่มา: (Yang et al., 2018)

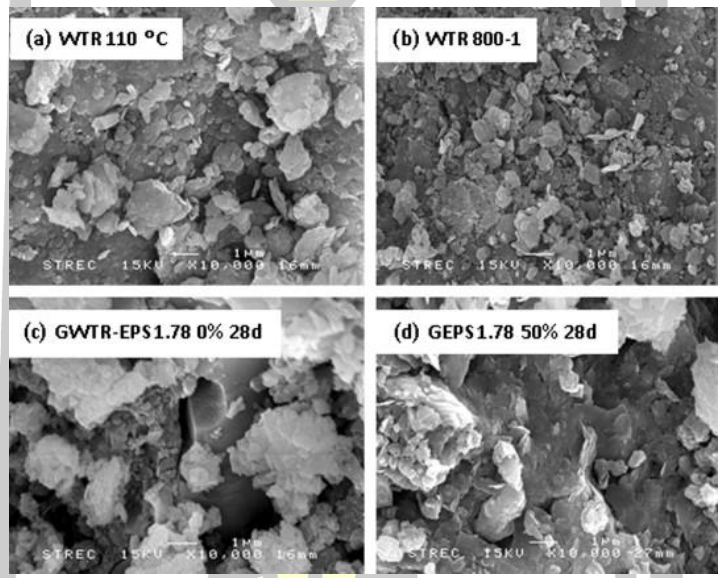
ตารางที่ 2 *องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน*

Composition (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
Fly ash	39.40	17.93	12.92	19.19	2.99	3.03	2.50	1.36	0.17

ที่มา: (มนตรี คงสุข และคณะ, 2559)

3. ตะกอนน้ำประปา (Wastewater sludge)

ตะกอนน้ำประปาเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากขบวนการผลิตน้ำประปา มีขบวนการผลิต คือ การนำน้ำดิบจากแม่น้ำลำคลองมาเติมสารเคมี (Coagulant) เพื่อเร่งการตกตะกอน แล้วเข้าสู่ขั้นตอนการรวมตะกอน (Flocculation) เพื่อให้ตะกอนจับตัวกันให้มีขนาดใหญ่และเข้าสู่ขั้นตอนการตกตะกอน (Sedimentation) เพื่อแยกส่วนของตะกอนน้ำประปา เมื่อผ่านขบวนการตกตะกอนจะเข้าสู่ขั้นตอนการกรอง (Filtration) และขบวนการฆ่าเชื้อโรค ก่อนส่งไปยังระบบประปาเพื่อใช้เป็นน้ำอุปโภคและบริโภค (เกียรติสุดา สมนา, 2559) ในการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร จะทำให้เกิดปริมาณตะกอนในระบบผลิตประมาณ 25 ถึง 30 กรัม (http://www.mwa.co.th/)



รูปที่ 7 *รูปจาก SEM ของ (a): แบบไม่เผา WTR (b): WTR เผาที่ 800 °C (c): WTR-based geopolymer ไม่มี EPS และ (d): WTR-based geopolymers กับ 50% EPS.*

ที่มา: (Waijarean et al., 2014)

สมบัติทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของตะกอนน้ำประปา พบว่าตะกอนน้ำประปามีองค์ประกอบทางเคมีที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณค่อนข้างสูงซึ่งเป็นสมบัติของปอซโซลาน เมื่อทำการเผาจะทำให้ซิลิกาลดลง แต่อะลูมินาสูงขึ้นและไม่มีค่า LOI เมื่อเทียบกับก่อนเผา ดังแสดงในตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนน้ำประปาคลายกับตะกอนดินเหนียวหรือตะกอนดิน ซึ่งการนำมาใช้จะต้องผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของตะกอนน้ำประปาให้มีอนุภาคเล็กลงโดยการตากแล้วนำไปบด และนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เพื่อเตรียมนำไปใช้งานต่อไป เมื่อดูจากภาพขยายด้วยกล้อง SEM จะเห็นได้ว่าเมื่อ

ทำการเผาตะกอนน้ำประปาจะทำให้มีอนุภาคที่เล็กลง และเมื่อเติม EPS จีโอโพลิเมอร์มีความแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่เติม EPS ดังแสดงในรูปที่ 7

2.2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลาน โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยซิลิกาและอะลูมินาที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในวัสดุปอซโซลาน จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) มีสมการทางเคมีดังแสดงในสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow xCaO.ySiO_2.zH_2O \quad (2.2)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \rightarrow xCaO.yAl_2O_3.zH_2O \quad (2.3)$$

ตารางที่ 3 *องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนน้ำประปา และตะกอนน้ำประปาเผา*

Composition (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
Wastewater sludge	56.76	20.33	0.70	6.03	-	0.47	1.51	4.63	6.95
Wastewater sludge 110 °C	54.00	29.30	9.84	1.01	0.97	0.43	2.58	-	-
Wastewater sludge 800 °C	53.70	30.10	9.56	0.98	1.00	0.38	2.49	-	-

ที่มา: (Waijarean et al., 2014)

2.3 เศษอะลูมิเนียมเหลือทิ้ง (Aluminum waste)

เศษอะลูมิเนียมเป็นเกรด AL 6063 (ASTM B120, 2002) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา และทนต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้ดีจึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง ตัวอย่างเช่น ประตู หน้าต่าง กันสาด ราวกันตก ราวบันได และผนังตกแต่ง เป็นต้น ซึ่งเศษอะลูมิเนียมที่ได้จากการตัดวงกบประตูและหน้าต่างอะลูมิเนียมในงานก่อสร้าง เมื่อทำการตัดกรอบวงกบให้ได้ขนาดตามแบบกำหนดหรือชิ้นส่วนอื่นๆ ด้วยใบตัดก็จะทำให้เกิดเศษขี้เลื่อยอะลูมิเนียมที่เป็นส่วนเหลือทิ้งไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งเศษเหล่านี้มีอะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ในรูปของแข็งที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

สมบัติทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเศษอะลูมิเนียมเหลือทิ้ง พบว่าเศษอะลูมิเนียมมีองค์ประกอบของอะลูมิเนียม อยู่ในปริมาณค่อนข้างสูงซึ่งอยู่ในรูปของแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 *องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด AL 6063*

Composition (%)	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other
Aluminum waste	99.00	0.02-0.06	0.35	0.10	0.10	0.45-0.90	0.10	0.10	0.10	0.15

ที่มา: (ASTM B120, 2002)

2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือวัสดุที่ได้จากการเผาวัตถุดิบหลัก 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุที่เป็นธาตุของปูนมีออกไซด์ของแคลเซียม เช่น หินปูนหรือหินชอล์ก และวัสดุที่เป็นอาจิลลาเซียสที่มีออกไซด์ของซิลิกอน เช่น ดินเหนียว หินเซลหรือหินดินดาน โดยเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้เม็ดปูน (Clinker) แล้วนำเม็ดปูนมาบดรวมกันกับยิปซัมเพื่อช่วยหน่วงการก่อตัวที่รวดเร็วของเม็ดปูน โดยใช้ประมาณของยิปซัมร้อยละ 2.5 ถึง 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2556) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งออกเป็น 5 ประเภทด้วยกันโดยแต่ละประเภทมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามการใช้งาน

2.4.2 สมบัติทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งออกไซด์ทั้ง 4 ตัวนี้จะต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 (Neville & Brooks, 1987) และปูนซีเมนต์ปอร์ดแลนด์ซีเมนต์ยังมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นอีกดังแสดงในตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระเนื่องจากผ่านการบด เมื่อดูจากภาพขยายด้วยกล้อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 8

ตารางที่ 5 *องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1*

Composition (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
Cement Portland	20.80	5.50	3.16	64.97	1.06	2.96	0.55	0.08	2.89

ที่มา: (Sata et al., 2012)

2.4.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เกิดจาก C_3S, C_2S, C_3A และ C_4AF แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

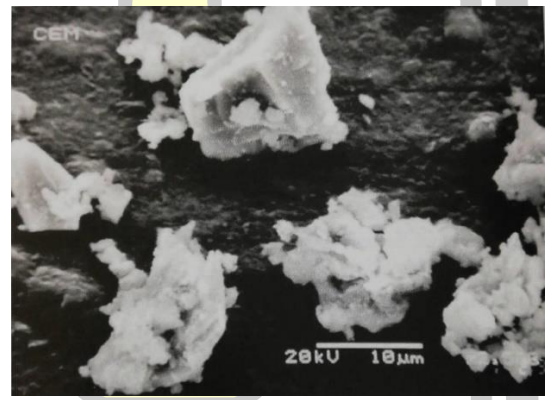
1. แคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$, CSH) และแคลเซียมไฮโดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$, CH) มีสมการทางเคมีดังแสดงในสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ (Lea, 1970)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$\text{หรือ } 2C_3S + 6H \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \quad (2.4)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

$$\text{หรือ } 2C_2S + 4H \longrightarrow C_3S_2H_3 + CH \quad (2.5)$$



รูปที่ 8 *ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคโดย SEM ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1*

ที่มา: (Sata et al., 2012)

2. แคลเซียมอะลูมิเนตและเฟอร์ไรต์ เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วแล้วได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุผลนี้จึงต้องเติมยิปซัมเพื่อหน่วงการก่อตัว และทำปฏิกิริยากับอิออนของซัลเฟต จะเกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไกต์ (Ettringite) มีสมการทางเคมีดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ (Mindess et al., 1981)

$$(3CaO.Al_2O_3) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

$$\text{หรือ } C_3A + 6H \longrightarrow C_3AH_6 \quad (2.6)$$

$$3(CaO.Al_2O_3) + 3(CaO.SO_3.2H_2O) + 26H_2O \longrightarrow 6CaO.Al_2O_3.\ 3SO_3.32H_2O$$

$$\text{หรือ } C_3A + 3C\bar{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32} \quad (2.7)$$

2.4.4 ไฮบริดจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ คือการผสมซีเมนต์ในจีโอโพลิเมอร์ที่มีสารตั้งต้นเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ให้ดีขึ้นในการยึดประสาน เมื่อบ่มในอุณหภูมิปกติจะให้กำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 ถึง 75 องศาเซลเซียส (Chindaprasirt & Rattanasak, 2017) ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่ทำให้เกิดความร้อน ที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของไฮบริดจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ไปในทางที่ดีขึ้นในอุณหภูมิปกติ (Pangdaeng et al., 2014)

2.5 สารผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures)

สารผสมเพิ่มที่ใช้ผสมในคอนกรีตนั้นมีสมบัติแตกต่างกันตามความต้องการในการใช้งานเพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตมีสมบัติการทำงานได้ที่ดีขึ้นในด้านต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM (ASTM C157/C157M, 2004) ได้แบ่งสารผสมเพิ่มออกเป็น 7 ชนิด คือ ชนิด A เป็นสารลดน้ำ ชนิด B เป็นสารหน่วงการก่อตัว ชนิด C เป็นสารเร่งการก่อตัว ชนิด D เป็นสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว ชนิด E เป็นสารลดน้ำและเร่งการก่อตัว ชนิด F เป็นสารลดน้ำจำนวนมาก และชนิด G เป็นสารลดน้ำจำนวนมากและหน่วงการก่อตัว ส่วนมากโดยทั่วไปแล้วสารผสมเพิ่มที่นำมาใช้ก็เพื่อปรับปรุงการทำงานได้ของคอนกรีตสด และให้กำลังอัดที่สูงขึ้น ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก็มีการนำมาใช้เพื่อการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวเช่นกัน การปรับปรุงสมบัติการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ด้วย Superplasticizers (SP) ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของเถ้าลอยช่วยให้การทำงานได้ดีขึ้นเมื่อวัดด้วยการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) ของจีโอโพลิเมอร์เทียบกันที่ไม่ได้เติม SP ซึ่งมีผลโดยตรงกับการทำงานได้และกำลังโดยตรงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบใน SP เช่น Naphthalene Melamine และ Modified Polycarboxylate (Nematollahi & Sanjayan, 2014)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่เป็นสารตั้งต้น และสารผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตะกอนน้ำประปา

Suksiripattanapong et al., 2015 ได้ทำการศึกษาหน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และโครงสร้างทางจุลภาค ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาจากตะกอนน้ำประปาและเถ้าถ่านหิน ใช้อัตราส่วน WWS/FA เท่ากับ 70:30 โดยพบว่าสำหรับอัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศ และปริมาณของอัลคาไลน์ปริมาณของอากาศมีผลต่อหน่วยน้ำหนักที่ลดลงอย่างชัดเจน และกำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อ Liquid (L)< Liquid limit state (LL) หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ L>LL การเพิ่มปริมาณอากาศขณะ L=LL คือค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์มวลเบาในเทอมของกำลังอัด และหน่วยน้ำหนัก SEM แสดงให้เห็นถึงค่า Lที่ต่ำนั้นไม่เพียงพอต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์มวลเบาให้เป็นเนื้อเดียวกัน และไม่เพียงพอต่อการชะ

ละลายซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินสำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ถึงแม้ว่าการเติบโตของปฏิกิริยาจะสังเกตเห็นได้ชัดจาก L>LL การหดตัวและรอยร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการสูญเสียของเหลวในโพรงจากความร้อนที่บ่มส่งผลให้กำลังอัดลดลง และพบว่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ในช่วง L=LL การบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสกับการเพิ่มระยะการให้ความร้อนในการบ่มส่งผลเกี่ยวกับการเติบโตของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้นไปอีกจนกระทั่งกำลังอัดสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 72 ชั่วโมง ถ้าเกินระยะเวลาที่เหมาะสมกำลังจะลดลง ผลของการเพิ่มโฟมอากาศเข้าไปจะทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางลงส่งผลให้การชะละลาย ซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินลดลง พบว่ากำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นสำหรับ L ที่อัตราส่วนสูงสุดของ Na_2SiO_3/NaOH < 80:20 มีผลต่อรอยร้าวขนาดเล็กของอนุภาคเถ้าถ่านหินตกตะกอนในช่วงเริ่มต้นก่อนเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน อย่างไรก็ตามจำนวนของอัตราส่วนที่ต่ำของ Na_2SiO_3/NaOH > 80:20 จะไม่เพียงพอต่อการชะละลายซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินเพื่อทำปฏิกิริยา การบ่มด้วยความร้อนจะกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ด้วยเหตุนี้ กำลังอัดจะได้จากช่วงของการบ่มมากที่สุด กำลังอัดจะพัฒนาอย่างมีนัยสำคัญ 7 วันหลังจากการบ่ม

Nimwinya et al., 2016 ได้ทำการศึกษาการใช้ตะกอนน้ำประปาและเถ้าแกลบ (WWS/RHA) เป็นวัสดุประสานที่ยั่งยืนในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์น้ำหนักเบา โดยใช้สารละลาย Na_2SiO_3 และ NaOH พบว่าจะเกิดของโพรงขนาดเล็กระหว่างขบวนการของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน และน้ำหนักที่เบาโดยธรรมชาติของเถ้าแกลบ ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์จะต่ำกว่าของคอนกรีตประมาณ 3 เท่า ซึ่งเป็นประโยชน์ในการใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเพื่อพัฒนาโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย และกำลังอัดถูกควบคุมโดยอัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 เมื่ออัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 ลดลงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการควบแน่นระหว่างชนิดของซิลิเกต และอะลูมิเนตจะเร็วกว่าซิลิเกตและซิลิเกต มีค่า UCS สูงสุดของอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบผสมตะกอนน้ำประปา พบว่าอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ที่ 4.9 และ 5.9 บ่มในอุณหภูมิห้อง 60 องศาเซลเซียส ทดสอบตัวอย่างอายุ 7 วัน พบว่าอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ที่ 4.9 ทดสอบ UCS ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะช่วยปรับปรุงจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบผสมตะกอนน้ำประปาให้ดีขึ้นแต่ถ้าอัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 น้อยกว่า 4.9 จะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบผสมตะกอนน้ำประปา และที่อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 ที่ 4.9 ของ จีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบผสมตะกอนน้ำประปามี Carbon footprint ต่ำกว่า OPC

Geraldo et al., 2017 ได้ทำการศึกษาตะกอนน้ำประปา และเถ้าแกลบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์อย่างยั่งยืน พบว่าการแทนที่ของ Metakaolin (MK) โดยตะกอนน้ำประปาไม่เผา (Wastewater sludge, WWS) ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์กับโซเดียมซิลิเกต ที่ได้จากเถ้าแกลบ (Rice

husk ash, RHA) ผลแสดงให้เห็นถึงสมบัติการเชื่อมประสานของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นกับปริมาณ WWS ในส่วนผสม การเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาการก่อตัว และอุณหภูมิการทดสอบแสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่ลดลง สมบัติการทำงานได้ และสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าลดลง เมื่อปริมาณของ WWS เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดทุกอายุการบ่มสูงกว่าที่ต้องการเล็กน้อยสำหรับส่วนประกอบของโครงสร้างทั่วไป มอร์ต้าทั้งหมดมีสมบัติทางกลที่สูงขึ้นกับเวลา ชี้ให้เห็นถึงความต่อเนื่องของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์กับ WWS แสดงให้เห็นช่องว่างจำนวนมาก และหน้าตัดโพรง Capillary ที่ต่ำลงเมื่อทำการบดอัดมอร์ต้าร์ และในการทดสอบยังพบเทคนิคที่มีความเป็นไปได้ในการทำจีโอโพลิเมอร์กับการแทนที่ของ MK ด้วย WWS ไม่เผา พบว่า โซเดียมซิลิเกต จาก RHA สามารถที่จะเพิ่ม SiO_2 เพื่อรักษาอัตราส่วนของมอร์ต้า ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะมีประโยชน์ที่ดีต่อสภาพแวดล้อม และเป็นวัสดุที่มีความประหยัด โดยใช้ WWS และโซเดียมซิลิเกตจาก RHA ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง

Waijarean et al., 2014 ได้ทำการศึกษากำลังอัด และโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากตะกอนน้ำเสียที่มีโลหะหนักตกค้าง พบว่าตะกอนน้ำเสียเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ โดยตะกอนน้ำเสีย (Water treatment residue, WTR) มี SiO_2 และ Al_2O_3 ในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตวัสดุก่อสร้าง หรือเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่แข็งตัวสำหรับกำจัดโลหะหนักอย่างปลอดภัยก่อนนำไปฝังกลบ ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าตะกอนน้ำเสียอาจเหมาะกับการผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง แต่ยังมีรายละเอียดอีกมากที่ต้องตรวจสอบปรับปรุงสมบัติทางกล การเผา WTR ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เป็นสภาพที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไข Dehydroxylation และ Destruction ขนาด 1:1 ของชั้นตาข่ายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นและแสดงให้เห็นโดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ FTIR พบว่าปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ระหว่าง WTR และ NaOH การพัฒนากำลังและการเกิดของเฟสผลึกโซเดียมอลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (NASH) เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา การเติมตะกอนมีนัยสำคัญในการลดอัตราของการพัฒนากำลังโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเริ่มต้น กำลังที่ลดลงเกิดจากการลดสัดส่วนของ WTR เกิดจากการเพิ่มของ Electroplating sludge (EPS) อย่างไรก็ตามการลดลงของกำลังที่พบเกิดจากการสะสมของสารประกอบที่ไม่ละลาย เช่น zinc oxide, zinc chromium oxide และ sodium iron oxide บนพื้นผิวของวัตถุดิบที่รบกวนปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน การสร้างของ Sodium aluminum iron ที่ไม่ละลายของ Silicate ชี้ให้เห็นถึงการละลายของ Si และ Al จากโครงสร้างของอะลูมิโนซิลิเกตใน WTR ภายใต้สภาวะความเป็นด่างที่สูงทำปฏิกิริยากับ โลหะหนักใน EPS เกิดการสร้างโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกต เพิ่มเข้าไปในการชะละลายของโลหะหนักจากจีโอโพลิเมอร์ ภายใต้การตรวจสอบที่พบว่า WTR มีประสิทธิภาพเชื่อมประสานเป็นของแข็งและกำหนดจำนวนที่เหมาะสมในการเพิ่มเข้าไปของโลหะหนัก

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเศษอะลูมิเนียม

Novais et al., 2018 ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำและผงอะลูมิเนียมที่มีต่อสมบัติของปริมาณของเสียของจีโอโพลิเมอร์โฟมที่มีน้ำหนักที่เบามาก และมีรูพรุนโดยการควบคุมส่วนผสม (ปริมาณอะลูมิเนียม และอัตราส่วน Solid-Liquid) พบว่ามีหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 430 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าการนำความร้อนที่ 78.6 มิลลิวัตต์ต่อมิลเคลวิน ซึ่งมีการเป่าสารทำให้เกิดโพรงเข้าไปตามจำนวน และปริมาตรของโพรงตามที่กำหนดในขณะที่อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมต่อระหว่างโพรงการนำความร้อนที่ต่ำ และค่าความหนาแน่นที่เห็นได้ชัดจากวัสดุที่เป็นนวัตกรรมเหล่านี้ ที่มีความเกี่ยวเนื่องกับขนาดโพรงที่กระจายตัว น่าจะนำไปประยุกต์ใช้กับงานฉนวนป้องกันความร้อน และยังพบอีกว่าการเพิ่ม Al แสดงให้เห็นการปรับปรุงระยะเวลามากสุด ให้มีการก่อตัวอย่ารวดเร็วของโฟมในระยะเริ่มต้นที่เป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการผลิตวัสดุ โดยในอนาคตจะพิจารณาช่วงการก่อตัวที่ดีภายใต้วัสดุผงอะลูมิเนียมในการสร้างโครงข่ายเจล ปัจจัยหลักคืออุณหภูมิการบ่มที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน แต่ปริมาณน้ำยังคงปรับเปลี่ยนขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน พบว่าการเร่งอุณหภูมิที่สูงและทำให้ปฏิกิริยารุนแรงขึ้นในขณะที่การเชื่อมประสานลดลงในขบวนการของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

Perná & Hanzlíček, 2014 ได้ทำการศึกษาการแข็งตัวของโครงสร้างของ จีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากของเสียเศษอะลูมิเนียม โดยพบว่าวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดของเสีย และการรักษาเสถียรภาพที่จะก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมแสดงให้เห็นว่าการใช้ของเสียจากอุสาหกรรมอลูมิเนียมคือส่วนประกอบที่ดีสำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันกับดินเหนียวที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะผลิตเป็นวัสดุในงานก่อสร้าง และเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนภายใต้เงื่อนไขไม่เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โดยมีค่ากำลังอัดที่ได้จาการทดสอบสูงถึง 30 เมกะปาสคาล และมีค่าการนำความร้อนที่จะสามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างบ้านพักอาศัย โดยมีสมบัติที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนไฟได้ดี โดยวัสดุที่ผ่านขบวนการเผาไหม้แล้วจะไม่เป็นอันตราย และไม่เกิดการย่อยสลายตัว

Pérez-Villarejo et al., 2018 ได้ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน ซึ่งใช้เถ้าถ่านหิน และกากแร่อลูมิเนียมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ พบว่าวิวัฒนาการจากเทคนิค XRD และ Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) ณ ช่วงอายุของการบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการออกแบบวัสดุที่ได้จากการใช้ดินขาวเผาผสมกับเถ้าถ่านหินและกากแร่อะลูมิเนียม เป็นสารตั้งต้นที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ กับสารละลาย NaOH 5 โมลาร์ และ$NaSi_2O_3$ โดยดูได้จาก SEM/EDS และพบว่า

จากการทดลองนี้มีความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าชีวะมวล กากแร่จากอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม เป็นวัตถุดิบใช้เพื่อทดแทนดินขาวเผาบางส่วนในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์

Onutai et al., 2015 ได้ทำการศึกษาของเสียจากอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ร่วมกับเถ้าถ่านหิน สำหรับทดแทนปูนซีเมนต์ โดยพบว่าอะลูมิเนียมและเถ้าถ่านหินเหลือทิ้งเหมาะสำหรับผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยศึกษาจาก 5 อัตราส่วนที่แตกต่างกันของเถ้าถ่านหินต่อของเสียจากอะลูมิเนียม คือ 100/0 90/10 80/20 60/40 และ 40/60 ความเข้มข้นของ NaOH คือ 5 10 และ 15 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของ NaOH 10 โมลาร์ ที่อุณหภูมิการบ่ม 80 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมเหลือทิ้งร้อยละ 40 โดยน้ำหนักได้ค่ากำลังอัดที่ 40 เมกะปาสคาล

Benavent et al., 2016 ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอะลูมิเนียมที่มีต่อโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์จากช่วงแรกจนถึงการก่อตัว โดยพบว่าเมื่อใช้สารละลายซิลิเกต และเติม $NaAlO_2$ เข้าไปในจีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการก่อตัวของโอลิโกเมอร์อ่อนแอลง ผลแสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยที่ลดลงของโอลิโกเมอร์สารละลาย ระยะเวลาการก่อตัวที่ลดลง และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความพรุนในจีโอโพลิเมอร์ ความเข้มข้นของโซเดียมอะลูมิเนตที่เพิ่มขึ้นในสารละลายทำให้ความพรุนลดลงอย่างเห็นได้ชัด พบว่าความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนของ Si/Al และ (Si + Al)/Na_2O โมลาร์ ที่สูงของอัตราส่วน (Si + Al)/Na_2O จะเร่งการละลายของ MK และอัตราส่วนที่ต่ำของ Si/Al ในสารละลายจะเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวทำละลายต่อเจลได้อย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันการเปรียบเทียบจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบที่เหมือนกัน แต่ไม่ได้ทำจากสารละลายซิลิกาทั่วไป และทำจากสารละลายอลูมิโนซิลิเกตนำไปสู่ระยะเวลาการก่อตัว และสมบัติการดูดซับไนโตรเจนที่เหมือนกัน เพราะผลกระทบระหว่างอัตราส่วนของ Si/Al และ (Si + Al)/Na_2O อย่างไรก็ตามการไหลของจีโอโพลิเมอร์มีความแตกต่างกันในเทอมของช่วง Elasticity การใช้สารละลายอะลูมิโนซิลิเกตของสารละลายซิลิกา ค่า Elasticity ของเพสต์ลดลงช่วยปรับปรุงการทำงานได้ในช่วงต้น และพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้ $NaAlO_2$ ในการปรับปรุงการไหลในการผสมซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าชานอ้อย

Noor-Ul-Amin et al., 2016 ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์และลักษณะของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อยที่เป็นของเสียจากโรงงานน้ำตาลและดินขาวจีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ โดยพบว่าสามารถแก้ปัญหากับวัสดุซีเมนต์แบบเดิมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก และต้องการพลังงานมหาศาล ยิ่งไปกว่านั้นของเสียจากโรงงานน้ำตาล เถ้าชานอ้อยและดินขาวสามารถ

นำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ อัตราส่วนเชื่อมประสานที่ดีสุดของเถ้าชานอ้อยกับดินขาวจีนสำหรับกำลังอัดสูงสุด 24.87 เมกะปาสคาล ของส่วนประกอบที่พบคือ 36:64 ซึ่งเทียบเท่าอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ที่ 2.5 จะให้กำลังอัดสูงสุดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์ที่ 19.45 เมกะปาสคาล กับอัตราส่วนของ polymer/sand เท่ากับ 1:1

Tchakouté et al., 2017 ได้ทำการศึกษาการใช้ Si_2O_3 จากเถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทางเลือกใหม่สำหรับดินขาวเผาที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าค่าที่ต่ำของซิลิกาจากของเสีย เช่น เถ้าชานอ้อย สามารถนำไปผลิต Si_2O_3 เป็นสารละลายที่สามารถนำไปใช้เร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ มีสมบัติทางกลที่ดีโดยให้ค่ากำลังอัดที่ 32.9 เมกะปาสคาล และการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 7.1 ผลการทดสอบการต้านทานของกำลังอัดหลังจากการบ่มน้ำที่ 28 วันมีค่าใกล้เคียงกันที่ 31.4 เมกะปาสคาล เทียบเคียงได้กลับของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมโดย Si_2O_3 จากเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสารละลาย Si_2O_3 จากเถ้าชานอ้อยสามารถที่จะใช้ในงานก่อสร้าง และวัสดุก่อสร้างที่มีความคล้ายคลึงกับสารละลายจากเถ้าแกลบ และ Si_2O_3 เป็นวัสดุที่ได้จากของเสียของโรงงานน้ำตาลสำหรับผลิตสารเคมีที่มีค่าสูง สารเคมีที่มีความจำเป็นสำหรับการเตรียมการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้พลังงานน้อย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม ในการใช้ประโยชน์จากของเสีย ซึ่งไม่เพียงประหยัดขึ้นแต่ยังส่งผลต่อการควบคุมมลพิษในด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

Imran & Anwar Khan, 2018 ได้ทำการศึกษาลักษณะของเสียจากการเกษตร เถ้าชานอ้อยที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส กับระยะเวลาที่ต่างกันโดยพบว่าจากการใช้เทคนิค SEM สังเกตเห็นว่าเถ้าชานอ้อยมีความยาวลดลงกับการเพิ่มขึ้นในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จาก 105 ไมโครเมตรต่อเมตร เป็น 50 ไมโครเมตรต่อเมตร จากการใช้เทคนิค EDS พบว่าส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อยมี Si ในช่วงร้อยละ 62 ถึง 72 โดยน้ำหนัก และเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการเผาที่เพิ่มขึ้น และจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD พบ SiO_2, CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 โดยออกไซด์จะช่วยให้กำลังเพิ่มขึ้นของโลหะ และวัสดุที่ไม่เป็นโลหะเมื่อใช้กับคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่ามีความหนแน่นที่ 1.234 กรัมต่อลูกบาตก์เซนติเมตร ในกรณีเผา 1 ชั่วโมง

2.6.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารผสมเพิ่ม

Salami et al., 2016 ศึกษาการผลกระทบของการเติมน้ำ และสารลดน้ำจำนวนมาก (Supperplasticizer) ที่มีต่อกำลังอัดช่วงต้น สำหรับการเลือกส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมัน และโครงสร้างทางจุลภาค ของการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมัน โดยการเพิ่มอัตราส่วนน้ำและสารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 3 และ 5 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิ 60± 5 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างที่เพิ่มน้ำจะให้กำลังอัดเท่ากับ 29.4 เมกะปาสคาล ลดลงคิด

เป็นร้อยละ 19 ของกำลังอัดที่เติมสารลดน้ำจำนวนมากที่อายุทดสอบ 28 วัน ตัวอย่างที่เพิ่มน้ำร่วมกับสารลดน้ำจำนวนมากมีกำลังอัดน้อยสุด พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่เติมน้ำดีกว่าเติมสารลดน้ำจำนวนมาก และยังพบอีกว่าการเติมน้ำจะส่งผลดีต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทั้งช่วงยังเป็นคอนกรีตสดและช่วงแข็งตัว

Alrefaei et al., 2020 ศึกษาปัจจัยของสารลดน้ำจำนวนมากที่มีผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหินที่ใช้ $Ca(OH)_2/Na_2SO_4$ เป็นตัวทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เพลส ตรวจสอบการทำงานได้ การก่อตัว และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพลส พบว่าสารลดน้ำจำนวนมากช่วยในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์แต่หน่วงเวลาการก่อตัว และเพิ่มกำลังอัด โดยสารลดน้ำที่แนะนำคือสารที่เป็นประเภทของ Polycarboxylate การใช้สารลดน้ำจำนวนมากช่วยลดความพรุน และเพิ่มความแน่นของอะลูมิโนซิลิเกตเจล ดังนั้นจะช่วยปรับปรุงให้กำลังอัดดีขึ้น พบว่าการเพิ่มสารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 3 จะหน่วงการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพลสอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $Ca(OH)_2/Na_2SO_4$ กับ Na_2SiO_3 พบว่า $Ca(OH)_2/Na_2SO_4$ มีกำลังอัดต่ำ มีการทำงานได้สูงและมีการก่อตัวที่ช้ากว่า

Pilehvar et al., 2020 ศึกษาการใช้ยูเรียเป็นสารลดน้ำจำนวนมากสำหรับจีโอโพลิเมอร์โดยจำลองวัสดุตั้งต้น และเถ้าถ่านหิน ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 โมลาร์ อัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น 0.35 ความเข้มข้นของสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 พบว่าส่วนผสมทางเคมีของวัสดุจำลองสามารถใช้งานได้ง่าย และใช้น้ำจำนวนน้อย ยูเรียสามารถหยุดพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นจะช่วยลดความหนืดในส่วนผสม การเพิ่มยูเรียกับ Polycarboxylate และ Naphtalene ของสารลดน้ำจำนวนมาก และจีโอโพลิเมอร์ควบคุม พบว่าเมื่อผสมยูเรียและบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำให้การก่อตัวเริ่มต้นนานขึ้น และอาจมีน้ำหนักมากหลังจากผสมในขณะที่สามารถรักษารูปร่างให้มั่นคงได้ ตัวอย่างที่ไม่มีสารผสมเพิ่มที่มีส่วนประกอบของ Polycarboxylate จะแข็งเกินไปสำหรับการนำเข้าแบบหล่อ ส่วนตัวอย่างที่มีส่วนผสมของยูเรีย และส่วนผสมของ Naphtalene สามารถใช้ในงานโครงสร้างโดยไม่มีความผิดปกติใดๆ พบว่ากำลังอัดช่วงต้นของสูงกว่าของสารลดน้ำจำนวนมากทั้ง 2 ชนิด และยังคงสูงขึ้นหลังจากผ่านการทดสอบ 8 รอบในสภาวะของแข็งและละลาย และยังพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของสารลดน้ำจำนวนมากมีอิธิพลต่อการก่อตัวและช่วยลดช่องว่างในตัวอย่างได้

2.6.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจีโอโพลิเมอร์ไฮบริดซีเมนต์

Mehta & Siddique, 2017b ได้ทำการศึกษากำลัง การซึมผ่าน และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ พบว่ามีสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์มีการปรับปรุงที่ระดับการแทนที่เถ้าถ่านหินของ OPC ที่แตกต่างกัน กำลังอัดในช่วงเริ่มต้นมีค่าสูง และ

สังเกตเห็นว่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ OPC เพิ่มขึ้นโดยทำให้โครงสร้างมีความแน่นขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของ CHS ที่เพิ่มเข้าไปใน CASH และ NASH กำลังอัดและกำลังแรงดึงแบบแยกส่วนมีค่าสูงสุดเป็นร้อยละ 20 ของ OPC การต้านทานคลอไรด์ของจีโอโพลิมอร์พบว่ามีการปรับปรุงด้วยการเติม OPC กับการซึมผ่านที่ต่ำและต่ำมากในทุกช่วงอายุ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบแยกส่วนมีปัจจัยการอัดแน่นกับกำลังอัด และกำลังอัดกับการซึมผ่านคลอไรด์แสดงให้เห็นว่ามีค่า R^2 ที่ต่ำ

Mehta & Siddique, 2017a ได้ทำการศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำรวมกับ OPC แทนที่เถ้าถ่านหินบางส่วน พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้นถึงร้อยละ 20 ทุกช่วงอายุ กำลังที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของแคลเซียมจากสารตั้งต้นด้วยกลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับการผลิตอลูมิโนซิลิกาโพลิเมอร์ริค การแทนที่ของ OPC ลงในเถ้าถ่านหินที่สูงถึงร้อยละ 20 จะช่วยลดการซึมผ่าน การดูดซับ ความพรุน และการดูดซับน้ำ นอกจากนี้ยังมีผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคที่มีนัยสำคัญที่ปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาครวมกับของ OPC การเพิ่มขึ้นของ OPC หลังจากร้อยละ 20 เป็นที่ชัดว่ากำลังลดลงรวมทั้งสมบัติการซึมผ่านเนื่องจากการสร้างของการเชื่อมประสารของจีโอโพริคต่ำกว่าไฮเดรชันของแคลเซียม และยังพบว่าตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีการซึมผ่านคลอไรด์ได้ปานกลางแต่การเพิ่มของ OPC ที่ร้อยละ 10 ปรับปรุงการต้านทานคลอไรด์อย่างมีนัยสำคัญคือการซึมผ่านน้อยทุกช่วงอายุ ในช่วงการเปลี่ยนผ่านมีผลที่ดีสำหรับตัวอย่างที่มีการแทนที่ของ OPC ร้อยละ 20

Shehab et al., 2016 ได้ทำการศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและทั้งหมด พบว่ากำลังอัด การยึดเกาะ แรงดึงแบบแยกส่วน และกำลังดัดที่ 28 วัน มีค่าสูงที่ร้อยละ 50 ของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เมื่อเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 25 75 และ100 กำลังอัดกับปริมาณวัสดุเชื่อมประสาร 300 กิโลกรัม และสารละลายร้อยละ 0.55 โดยเพิ่มซีเมนต์ร้อยละ 20.8 43.6 38.0 และ 28 ที่อัตราส่วนร้อยละ25 50 75 และ 100 เปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ กำลังอัดกับวัสดุเชื่อมประสารที่ 300 กิโลกรัม และอัตราส่วนของสารละลายร้อยละ 0.45 เพิ่มขึ้นโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 20.8 16.4 และ 7.6 มีอัตราส่วนเทียบเท่าร้อยละ 25 50 75 และ 100 ตามลำดับเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ กำลังอัดที่มีวัสดุเชื่อมประสาร 350 กิโลกรัม และอัตราส่วนสารละลายร้อยละ 0.45 เพิ่มขึ้นโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.7 9.7 3.3 และ 1.3 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 เทียบกับไม่มีการแทนที่ กำลังดัดมีค่าเทียบเท่ากำลังอัดที่ร้อยละ 10.98 กำลังแรงดึงเทียบเท่าร้อยละ 13.3 ของกำลังอัด และกำลังการยึดเกาะเทียบเท่าร้อยละ 16.18 ของกำลังอัด กำลังรับแรงดัดถึง 40.8 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 กับวัสดุเชื่อมประสาร 350 kg และอัตราส่วนสารละลายร้อยละ 0.55 กำลังแรงดึงแบบแยกส่วนมีค่ามากถึง 49.58 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ที่การแทนที่ร้อยละ 50 และมีกำลังการยึดเกาะมีค่า 61.04 กิโลกรัมต่อ

ตารางเซ็นติเมตร ที่การแทนที่ร้อยละ 50 วัสดุเชื่อมประสาร 350 กิโลกรัม และอัตราส่วนสารละลายร้อยละ 0.55

Roviello et al., 2017 ได้ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์น้ำหนักเบาที่ผสมปูนซีเมนต์ พบว่าวัสดุสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน 2 ประเภท คือสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์โดยผสมดินขาวเผาและสารละลายที่เป็นด่างกับการผสมของ Dialkylsiloxane oligomers หรือ สารอนินทรีย์โดยการควบคุมซิริกอนผงที่เพิ่มเข้าไปใน Foming agent ในทั้ง 2 กรณีการเพิ่มของส่วนประกอบสารอินทรีย์ หรือของ Dialkylsiloxane oligomers ไม่มีแนวโน้มที่เป็นนัยสำคัญของการไหลของจีโอโพลิเมอร์ จึงช่วยให้เป็นฟองสม่ำเสมอและมีขั้นตอนการเกิดฟองมีความสม่ำเสมอในอนุภาค ในกรณีของส่วนประกอบโฟมที่ได้โดยการเพิ่มสารตั้งต้น Organic resin เข้าไปใน Slurry จีโอโพลิเมอร์ การไหลที่สูงของการผสมใหม่มีลักษณะที่ยอมให้ทางโครงสร้างจุลภาค โดยโพลงเซลล์กับค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 3 มม. ในทรงกลมที่หนาแน่นของอีพ็อกซี่เรซิ่นก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกันทางโครงสร้างจุลภาคของผนังเซลล์ที่จะทำหน้าที่กีดขวางทางกายภาพสำหรับระยะการเจริญเติบโตของเซลล์ ความแปรปรวนในกรณีของโฟม G-Sil การไหลที่ต่ำของ Slurry ที่ยอมให้สำหรับการเติบโตของเซลล์ในปริมาตรจำนวนมาก ซึ่งนำไปสู่การลดสเถียรภาพของโฟม ในทางกับกันเซลล์แต่ละตัวจะรวมตัวกันทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ วัสดุพรุนเหล่านี้แม้จะมีลักษณะความเป็นสัณฐานของเซลล์ยังคงมีลักษณะของสมบัติทางกลที่น่าสนใจ ในอนุภาคชี้ให้เห็นสำหรับโฟมทั้งสองมีค่าเฉลี่ยกำลังอัด 5 เมกะปาสคาล อยู่ในช่วงความหนาแน่น $0.2e^{0.5}$ กรัมต่อตารางลูกบาตก์เซ็นติเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีของวัสดุที่มีน้ำหนักเบา อย่างไรก็ตามช่วงความหนาแน่นที่เหมือนกันของโฟมชนิด G-Sil และ G-Ep แสดงให้เห็นถึงการทนไฟที่ดีและการนำความร้อนที่ต่ำอยู่ในช่วง $0.101e^{0.105}$ วัตต์ต่อเมตรเคลวิน สมบัติเหล่านี้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมจีโอโพลีเมอร์ที่มีรายงานในงานวิจัย และเทียบเท่าหรือดีกว่าของสารอนินทรีย์ทั่วไปวัสดุโฟมที่มีความหนาแน่นคล้ายกัน และอาจเกี่ยวกับลักษณะไฮบริดของวัสดุที่ใช้ ซึ่งในความเป็นจริงแสดงให้เห็นในกรณีของความหนาแน่นของโฟร์ม ผลกระทบของการสังเคราะห์ของสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ทำงานรวมกันของการพัฒนาวัสดุที่มีผลกระทบที่เป็นประโยชน์ต่อสมบัติมันสามารถที่จะเป็นวัสดุไฮบริดแบบใหม่ที่เป็นวัสดุทางเลือกที่ใช้สารอินทรีย์โฟมสำหรับเป็นฉนวนและประยุกต์ใช้สำหรับวัสดุน้ำหนักเบารวมกับอย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน

2.6.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความคงทนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

Lau et al., 2019 ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหิน โดยใช้ nanoindentation และโครงข่ายประสาทเทียม ในการวิจัยนี้พวกเขาใช้จีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหิน 9 มิกซ์ กับ 4 ตัวแปร ได้แก่ Silica fume (SF), sand to cementitious ratio

(s/c), liquid to solid ratio (l/s) และ superplasticizer (SP) พบว่าจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่มีเพียงเถ้าถ่านหินอย่างเดียว ที่อัตราส่วน l/s เท่ากับ 0.6 ให้ค่าการต้านทานการสึกกร่อนสูงสุด โครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการต้านทานการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหินซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์ที่ดี ด้วยแอพพลิเคชั่นของวิธีการแยกส่วนมันจะรายงานว่าดัชนีพลาสติกของ N-A-S-H เป็นการทำกับปฏิกิริยากับตะกอนบางส่วน และตะกอนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะแสดงแนวโน้มการลดลงของดัชนีพลาสติกกับการเพิ่มขึ้นของความแข็งหรือโมดูลัส เฟสของตะกอนที่ไม่ทำปฏิกิริยาแสดงแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความแข็งและโมดูลัส นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับการทำปฏิกิริยากับดัชนีพลาสติก (PI) พบว่าการการทำปฏิกิริยาที่ระดับสูงนั้นนำไปสู่การก่อตัวส่วนหนึ่งของ N-A-S-H ปริมาณสูง ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นและปรับปรุงการต้านทานการสึกกร่อนที่ดีขึ้น ซึ่งแอปพลิเคชันของ Nanoindentation ด้วยวิธีการแยกส่วนนั้น มีความเหมาะสมในการหาปริมาณ PI ของเฟสและความต้านทานการสึกกร่อนของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าถ่านหินมอร์ต้าร์

Deb et al., 2015 งานวิจัยล่าสุดได้ทำการศึกษาการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสม GGBFS ที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง จากการศึกษาการผสม GGBFS ในจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าถ่านหินชนิด low-calcium มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการก่อตัวและการพัฒนากำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง ส่วนงานวิจัยนี้พวกเขาจะนำเสนอพฤติกรรมการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหิน class F กับการแทนที่ของ GGBFS ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ20 และอัตราส่วนของ sodium silicate to sodium hydroxide (SS/SH) เท่ากับ 1.5 หรือ 2.5 การทดสอบโดยใช้ จีโอโพลิเมอร์ 4 ตัวอย่าง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัวอย่าง บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง ทำการเปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กับสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีต พบว่าการหดตัวที่ลดลงกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอน และการลดลงของอัตราส่วน SS/SH ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง พบว่าการหดตัวเมื่อแห้งที่อายุ 180 วัน เทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดคล้ายกัน ด้วยเหตุนี้การหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต สามารถลดลงเป็นค่าที่อยู่ภายในขีดจำกัดแนะนำในมาตรฐานออสเตรเลียสำหรับคอนกรีต OPC ปกติ

Singh et al., 2016 ได้ทำการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของการทำปฏิกิริยาที่มีต่อกำลังอัด ITZ และหดตัวแบบแห้งของเถ้าถ่านหินต่อตะกอนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ปฏิกิริยา Geopolymerization ของเถ้าถ่านหินและตะกอนในมิกซ์เดี่ยวที่ใช้ในการศึกษาในสภาวะแวดล้อมกับการช่วยในการวัดการนำความร้อน การเพิ่มความเข้มข้นของปฏิกิริยาในการผสมนำไปสู่ระยะเวลาที่สั้นลงของเวลาเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับตำแหน่งสูงสุดในเส้นกราฟความร้อนซึ่งแสดงให้เห็นการสูญเสียความสามารถใช้งานได้และแข็งตัวที่เร็วขึ้น จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยเถ้าชานอ้อยกับตะกอนและ

แปรผันความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา และทำการทดสอบสมบัติเชิงกล อายุการแข็งตัว และการหดตัวเมื่อแห้ง กำลังอัดที่เหมาะสมคือมิกซ์ที่มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ พบว่าความพรุนของอสัณฐานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ขยายไปยังพื้นผิวภายใต้การขยายภาพด้วย Field emission scanning electron microscope (FESEM) มันเป็นที่น่าพอใจในส่วนพื้นผิวที่อยู่ระหว่างมวลรวมกับเพสต์ กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น และอัตราส่วน Poisson's ratio ลดลงกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา ทำซ้ำภายใต้ผลของการลดน้ำหนักลงตัวอย่างทดสอบเสียหายระหว่าง 95 ถึง 224 โดยการกระแทกด้วยค้อนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ให้กำลังอัดช่วงอายุแรกเร็วกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีต ซึ่งทำนายโดยการเทียบเท่ากับข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI 209R-92 พบว่าการหดตัวเมื่อแห้งของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ประมาณร้อยละ 0.1 เท่านั้นที่ช่วงอายุ 6 เดือน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่ผสมตะกอนมีความเป็นไปได้ที่จะผลิตในสภาพอุณหภูมิห้อง ที่ต้องการกำลังอัดที่คล้ายกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีต

Gunasekara et al., 2016 ได้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านในระยะยาวของจีโอโพลีเมอร์เถ้าถ่านหินคอนกรีตที่แตกต่างกัน จีโอโพลิเมอร์เหมาะสำหรับการผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยการทำปฏิกิริยากับเถ้าถ่านหินด้วยการใช้สารละลายที่เป็นด่างสูงในการทำปฏิกิริยา Polymerisation พารามิเตอร์ที่สำคัญในการหาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ของจีโอโพลิเมอร์ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในระยะวาลาที่ยาวขึ้นของวัสดุก่อสร้าง การหาลักษณะของความคงทน มีรายละเอียดของการซึมผ่านของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แตกต่างกัน 4 ตัวอย่าง ที่อายุในการทดสอบ 1 ปี พบว่ามีการปรับปรุงสมบัติความคงทนทุกตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต นี่คือสาเหตุที่ต่อเนื่องของจีโอโพลีเมอไรเซชันซึ่งส่งผลให้เกิดการก่อเจล อย่างต่อเนื่องนำไปสู่ปริมาณที่หนาแน่นมากขึ้นของโครงสร้างทางจุลภาคซึ่งเกี่ยวข้องกับการลดขนาดรูพรุน และรูพรุนในระดับมาโคร ความแน่นของการหล่อคอนกรีตควบคู่กับการกระจ่ายตัวของรูพรุนจะถูกตรวจสอบด้วยการซึมผ่าน และการแพร่กระจายลักษณะของคอนกรีต ซึ่งการเพิ่มขึ้นของรูพรุนในระดับมาโคร แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของเจลของเมทริกซ์ และในทางกลับกันมันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการดูดซึมน้ำ ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของรูพรุนในระดับมาโครที่สูงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการซึมผ่านน้ำและอากาศของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ปริมาณของมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ในเถ้าถ่านหินส่งผลให้การกระจายตัวของเจลไม่สม่ำเสมอซึ่งจะไปลดความสามารถในการอุดรูพรุน ในขณะที่การปรากฏของ CaO มีปริมาณสูง ซึ่งจะถูกตรวจสอบเพื่อนำไปสู่การหล่อคอนกรีตให้หนาแน่นในระดับจุลภาค พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในช่วงเริ่มต้นมีความคล้ายคลึงกับค่าที่สังเกตได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีต และลดลงตามอายุในลักษณะที่คล้ายกัน

Fan et al., 2018 ได้ทำการศึกษาสมบัติเกี่ยวกับความร้อนและสมบัติทางกลจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหินใช้สารละลาย KOH และ Na_2SiO_3 โดยที่มีอัตราส่วนของ ซิลิเกตต่อไฮดรอกไซด์ พบว่ารูปแบบการพังเสียหายของตัวอย่างในอุณหภูมิ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส มีลักษณะแตกที่ผิวแบบเรียบ และไม่มีรูปแบบที่ต่อเนื่องกันแบบสม่ำเสมอ กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการบ่มตามเงื่อนไขที่เหมาะสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อเถ้า เท่ากับ 0.20 ถึง 0.35 มีกำลังอัดสูงกว่า 80 เมกะปาสคาล และที่อัตราส่วนน้ำต่อเถ้า เท่ากับ 0.20 มี 1 ค่ากำลังอัดที่สูงถึง 110 เมกะปาสคาล และมีกำลังอัดลดลงหลังจากผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสกำลังจะลดต่ำลง 96 เมกะปาสคาล และ 12 เมกะปาสคาล หลังจากผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส การหดตัวผิวแห้งตามแนวยาวของตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อเถ้า เท่ากับ 0.20 มีค่าร้อยละ 2 หลังจากผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เทียบกับการขยายตัวร้อยละ 9.4 หลังจากผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส กำลังอัดที่อัตราส่วน water/ash เท่ากับ 0.25 และ0.30 มีความใกล้เคียงกันมาก กำลังอัดที่อัตราส่วน 0.30 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า และเหมาะสมสำหรับใช้เป็นอัตราส่วนผสม และยังพบอีกว่าตัวอย่างทุกตัวอย่างไม่เกิดการแยกตัวเมื่อผ่านความร้อนและทำให้เย็นตัวลง โดยโครงสร้างทางจุลภาคที่มีความพรุน และหลวมสังเกตเห็นได้จากตัวอย่างที่ผ่านอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งบางที่อาจจะเกิดจากไอออนของพันธะทางเคมีของน้ำ และไฮโดรเจนในกลุ่มของ OH

Parveen et al., 2018 ได้ทำการศึกษาผลกระทบของนาโนซิลิกาที่มีต่อความคงทนทางเคมีและประสิทธิ์ภาพทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าถ่านหิน ได้จำลองสภาพแวดล้อมทางเคมีคือ ร้อยละ 5 ของกรดซัลฟูริก ร้อยละ 5 ของกรดแมกนีเซียม และร้อยละ 3.5 ของน้ำทะเล พบว่าจากการตรวจสอบด้วยตาผลชี้ให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (GPC) มีการกัดเซาะพื้นผิวปานกลางในขณะที่คอนกรีตทั่วไป (OPC) มีการกัดเซาะที่รุนแรงกว่าเนื่องจากมีปริมาณของ CaO ที่สูงภายใต้สภาวะของกรดซัลฟูริก นอกจากนี้การเริ่มต้นในบำรุงรักษาตัวอย่าง GPC ภายใต้เงื่อนไขในสภวะของกรดแมกนีเซียม และน้ำเสีย สีของตัวอย่าง OPC มีการเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีขาว ผลกระทบที่ดีของนาโนซิลิกาที่มีต่อประสิทธิภาพต่อความคงทน GPC สามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ของการระเบิดจากสารเคมี น้ำหนักที่เสียไปของตัวอย่าง OPC เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในสภาพแวดล้อมมากกว่า 1 ใน 3 ของน้ำหนักที่เสียไปจากการบ่มด้วยความร้อนของตัวอย่าง FAGPC ผลแสดงให้เห็นว่านาโนซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปไม่มีผลหรือมีผลกระทบน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง โดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นพบว่าเกือบทุกตัวอย่างภายใต้สภาพแวดล้อมทางเคมีในระยะเวลา 15 วัน แรกของการสัมผัสเนื่องจากการดูดซับสารละลายและและการขยายตัวเกิดจากยิปซั่มหลังจาก 30 วัน ของการของการสัมผัส น้ำหนักเพิ่มขึ้นสำหรับตัวอย่างทั้งหมดเมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น น้ำหนักจะยังเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปอีก 30 วันของการสัมผัสสภาพแวดล้อมทางเคมี ที่ยอมรับได้สำหรับในสภาวะของกรดซัลฟูริก น้ำหนักที่ลดลงสังเกตเห็นในตัวอย่างที่สัมผัสกับ

กรดซัลฟูริก ตั้งแต่กรดซัลฟูริกไปทำลายคอนกรีตจากระยะเวลาที่เริ่มสัมผัส รวมไปถึงตัวอย่างนาโนซิลิกาแสดงให้เห็นน้ำหนักที่ลดลงน้อยภายใต้กรดซัลฟูริก และน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นน้อยภายใต้น้ำเสีย และแมคนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากความหนาแน่นของโครงสร้าง ผลของกำลังอัดชี้ให้เห็นชัดเจนว่า OPC มีประสิทธิภาพดีกว่า GPC ที่อัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีตหรือสารละลายด่างต่อสารเชื่อมประสารที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตาม การเสื่อมสภาพสำหรับตัวอย่าง OPC มีค่าสูงภายใต้สภาวะทางเคมี กำลังทางกลที่ลดลงต่ำสุดภายใต้สภวะทางเคมี สังเกตได้ใน ตัวอย่าง FAII+NS มากกว่า FAI+NS เนื่องจาก FAII มีจำนวนของแคลเซียมที่ต่ำกว่า สามารถสรุปได้ว่า CaO ทำให้เกิดการเสื่อมสภาะของคอนกรีตภายใต้สภาวะทางเคมีในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ที่สัมผัสสารเคมี GPC ประเภท FAII+NS พบว่ามีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ต้องสัมผัสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ผลการทดสอบแรงดึงแบบแยกส่วนของตัวอย่าง FAGPC โดยใช้มาตรฐาน ACI 363-R9 และใช้รูปแบบ CEB-FIP ของ OPC และมีความสัมพันธ์ที่ดีที่ได้ระหว่างสมบัติทางกลและการร้าวของตัวอย่าง FAGPC ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของตัวอย่าง FAGPC แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่คลายกับ OPC และยังพบว่านาโนซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปในตัวอย่าง GPC ประเภท FAI และ FAII ช่วยปรับปรุงกำลังอัดและการกระจายตัวสูงภายใต้สภาวะทางเคมีที่หลากหลายเนื่องจากมีความพรุนและการซึมผ่านที่ต่ำ เป็นผลจากโครงสร้างที่มีความหนาแน่น ดังนั้นการใช้นาโนซิลิกาจะช่วยขยายอายุการใช้งานของโครงสร้างภายใต้สภวะแวดล้อมทางเคมีที่หลากหลาย

Parveen et al., 2018 ได้ทำการศึกษาสมบัติโครงสร้างจุลภาค และทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตร่วมกับ Alccofine ที่บ่มในสภาวะแวดล้อม พบว่า จีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกับ Alccofine มีการปรับปรุงสมบัติทางโครงสร้างจุลภาค และทางกล ที่อายุ 28 วัน GPC ที่บ่ม ณ อุณหภูมิในสภาพแวดล้อม พบว่ามีการปรับปรุงกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มเข้าไปในปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน กำลังอัด แรงดึง และกำลังการดัด ณ การบ่มที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมกับความเข้มข้นของ NaOH 16 โมลาร์ และปริมาณของเถ้าถ่านหินเท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาตก์เมตร มีค่าสูงสุด รูปแบบของความเค้นและความเคลียดที่เสนอโดย Junaid และคณะ ให้ผลดีต่อการทำนายพฤติกรรมกำลังอัดของ GPC ที่บ่มในอุณหภูมิสภาพแวดล้อมทั่วไป การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ช่วยให้แยกการเพิ่มขึ้นของการบดอัดของโครงสร้างของ GPC Alccofine มีโครงสร้างที่แน่นและมีร้อยแตกร้าว หลุม ที่มีขนาดเล็กลดลงทำให้ยืนยันได้ถึงกำลังอัดที่สูง การเพิ่มของ Molarity ของโซเดียมไฮดรอกไซน์จะช่วยเพิ่มกำลังอัดแต่การทำงานได้จะลดลง

Punurai et al., 2018 ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลโครงสร้างจุลภาคและการหดตัวแบบแห้งของไฮบริดจีโอโพลีเมอร์เถ้าถ่านหินผสมบะซอลต์ไฟเบอร์ งานวิจัยนี้จะเป็นการประเมิณค่าสมบัติเชิงกล โครงสร้างทางจุลภาค และการหดตัวเมื่อแห้งของไฮบริดจีโอโพลิเมอร์ผสมบะซอลต์ไฟเบอร์ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 0 10 20 40 และ100 อัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 1.0 และ

อัตราส่วนของ L/B เท่ากับ 0.60 ที่ใช้ในการผลิตไฮบริดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ทำการทดสอบระยะเวลาการแข็งตัว กำลังอัด และการหดตัวแบบแห้ง พบว่าการแทนที่ของบะซอลไฟเบอร์ส่งผลให้ระยะเวลาการแข็งตัวเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้กำลังอัดลดลง และการหดตัวแบบแห้งลดลง เส้นใยบะซอลต์ทำหน้าที่เป็นเส้นใยเสริมแรงขนาดเล็กและเพิ่มการพัฒนาของ CSH, CASH และ NASH ซึ่งปรับปรุงเพิ่มเติมคุณสมบัติของเพสต์ นอกจากนี้ความพรุนทั้งหมดและขนาดรูพรุนที่สำคัญของจีโอโพลีเมอร์เถ้าถ่านหินเพสต์ ลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของการแทนในเถ้าถ่านหินซึ่งทำให้เพสต์เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและหนาแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับ จีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหินเพียงอย่างเดียว

Mehta & Siddique, 2017b ได้ทำการศึกษากำลังอัด การซึมผ่าน และลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำ ในงานวิจัยนี้พวกเขานำเสนอสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยชนิดแคลเซียมต่ำ กับการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ดำเนินการทดสอบความสามารถการทำงานได้ กำลังอัด กำลังดึงแยกส่วนและการซึมผ่าน rapid chloride permeability (RCPT) ที่อายุ 28 วัน ดำเนินการวิเคราะห์ SEM, EDS และ XRD ผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าความสามารถการทำงานได้กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเพิ่มกำลังอัดและลดความสามารถการทำงานได้และลดการซึมผ่านที่ตัวอย่างอายุ 3 7 และ 28 วัน อย่างไรก็ตามผลการแทนที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือร้อยละ 20 ผลการวิเคราะห์ของ SEM, EDS and XRD ยืนยันได้ว่ามีการปรับเปลี่ยนในโครงสร้างเมทริกซ์ของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งทำให้หนาแน่นขึ้นและดูดซึมได้น้อย

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยแบ่งการศึกษาวิจัยออกเป็น 6 ส่วนด้วยกันดังนี้

3.1.1 ศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.2 ศึกษาความสามารถในการทำงานได้ ด้านการยุบตัว และการก่อตัว

3.1.3 ศึกษาการหดตัวเมื่อแห้ง

3.1.4 ศึกษากำลังอัด

3.1.5 ศึกษาการซึมผ่านน้ำ

3.3.6 ศึกษาการทนต่อการสึกกร่อน

3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เถ้าชานอ้อย (BA) อัตราส่วนลูกเหล็กต่อเถ้าที่ใช้ในการบด 2 ต่อ 1 ใช้ระยะเวลาในการบด 6 ชั่วโมง จนได้อนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.2.2 ตะกอนน้ำประปา (WWS) ใช้ระยะเวลาในการตากให้แห้ง 2 ถึง 3 วัน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนลูกเหล็กต่อตะกอนน้ำประปาที่ใช้ในการบด 5 ต่อ 1 ใช้ระยะเวลาในการบด 8 ชั่วโมง จนได้อนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.2.4 เศษอะลูมิเนียมนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้างเบอร์ 40

3.2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานของ มอก. 15 เล่มที่ 1

3.2.6 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายที่มีโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.5 ถึง 2.9 เตรียมแบบ SSD

3.2.7 มวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อย (A) หินบะซอลต์โพรงข่าย (B) และกรวดแม่น้ำ (C) ที่มีขนาด 3/8” เตรียมแบบ SSD

3.2.8 น้ำกลั่นใช้สำหรับเป็นตัวผสมเพื่อเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.2.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 เตรียมสารละลายให้มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยนำมาละลายกับน้ำกลั่นทิ้งให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

3.2.10 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ Na_2O ร้อยละ 15.32 SiO_2 ร้อยละ 32.87 และ H_2O ร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก

3.2.11 สารลดน้ำพิเศษ ชนิดซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Super plasticizer) Type F และ G) ชนิดที่มีส่วนประกอบของ Polycarboxylate-based

3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 300 ตัน (Universal testing machine)

3.3.2 เตาเผาไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 1,200 องศาเซลเซียส (Electrical Burn)

3.3.3 เครื่องบด (Grounding machine)

3.3.4 เครื่องทดสอบการต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion resistance)

3.3.5 เครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ (Water permeability testing machine)

3.3.6 เครื่องทดสอบการสึกร่อน (Los Angelis machine)

3.3.7 เครื่องร่อนแบบตะแกรง (Sieve shaker machine)

3.3.8 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Weighting machine)

3.3.9 เครื่องเขย่าคอนกรีตแบบโต๊ะ (Vibrating table)

3.3.10 เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete mixer machine)

3.3.11 เตาอบไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 200 องศาเซลเซียส (Electric Oven)

3.3.12 ตะแกรงร่อนทราย ขนาดเบอร์ 20, 40 และ 325

3.3.13 ตะแกรงร่อนหิน ขนาดเบอร์ 1/2 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว และ PAN

3.3.14 บีกเกอร์ขนาดความจุ 500 มิลลิลิตร และ 1,000 มิลลิลิตร

3.3.15 แท่งแก้วกวนสาร

3.3.16 แบบหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

3.3.17 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 10x10x10 เซนติเมตร

3.3.18 แบบหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร

3.3.19 พลาสติกฟิล์มแรป มาตราฐาน 15 ไมครอน

3.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.1 องค์ประกอบทางแร่ ของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปา โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffractometer)

3.4.2 องค์ประกอบทางเคมี ของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปา โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence)

3.4.3 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย และการดูดซึมน้ำของมวลรวม โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 127 และ ASTM C 70 ตามลำดับ และค่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ

3.4.4 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ Laser Diffraction Particle Analysis

3.4.5 ทดสอบความละเอียดโดยวิธีร่อนน้ำผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 คำนวณหาร้อยละค้างบนตะแกรงของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผา

3.4.6 การวิเคราะห์พื้นผิวและขนาดรูพรุนของอนุภาคของเถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผาโดยใช้เทคนิคแบบ Surface area pore size and Pore volume distribution analyzer (BET)

3.5 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตะกอนน้ำประปา เศษอะลูมิเนียม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกนำมาใช้แทนที่เถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 0.4 ถึง 7.5 โดยน้ำหนัก สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร จะมีปริมาณของเถ้าชานอ้อยประมาณ 410 กิโลกรัม ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสดถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยใช้การวัดค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 50±25 มิลลิเมตร มีการแปรผันอัตราส่วนสารละลายต่อสารตั้งต้น AL/B เท่ากับ 0.60 0.55 และ 0.50 และเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และคงที่ของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต (NaOH/ Na_2SiO_3) เท่ากับ 1

สำหรับส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยที่อัตราส่วนสารละลายต่อสารตั้งต้น 0.55 และ 0.50 จะนำมาเติมสารผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตประเภท ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Superplasticizer) Type F, G และน้ำ เพื่อปรับปรุงค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสด สัดส่วนผสมที่ใช้หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และทดสอบตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 6 ถึง 15

3.6 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้ง

3.6.1 ศึกษาระดับการแทนที่ (Replacement levels) ของวัสดุที่ใส่แทนที่ในเถ้าชานอ้อย ได้แก่ ตะกอนน้ำประปาร้อยละ 5 และ7.5 เศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 6 ถึง 15 ตามลำดับ และแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 19

3.6.2 ศึกษาอัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อสารละลาย (Coarse aggregate to liquid ratios, CA/AL) ที่อัตราส่วน 5 5.5 และ 6 โดยน้ำหนัก

3.6.3 ศึกษาอัตราส่วนสารละลายต่อสารตั้งต้น (Alkaline to Binders, AL/B) ที่อัตราส่วน 0.60 0.55 และ 0.50 โดยน้ำหนัก

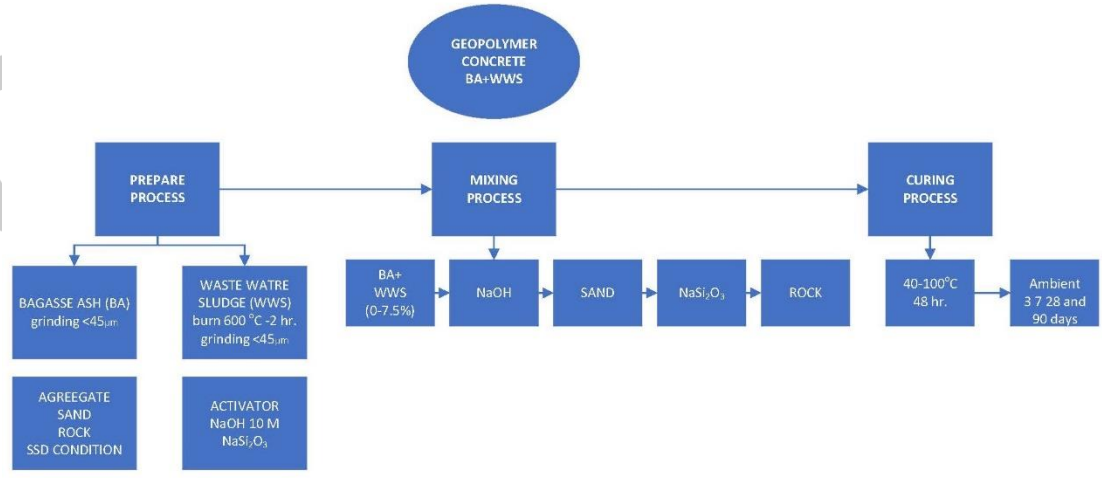
3.6.4 ศึกษาระดับของอุณหภูมิการบ่ม (Temperature of heat curing) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มในการทดสอบ ได้แก่ 100 80 60 และ 40 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 48 ชั่วโมง และบ่มในห้องปฏิบัติการจนครบอายุการทดสอบ

3.6.5 ศึกษาการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุที่ทำการทดสอบ 3 7 28 และ 90 วัน

3.6.6 ศึกษาการปรับปรุงการทำงานได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มชนิด Superplasticizers ประเภท F, G และเติมน้ำในอัตราส่วน ร้อยละ 0 1 3 และ 5 ตามลำดับ โดยน้ำหนักเถ้าชานอ้อย

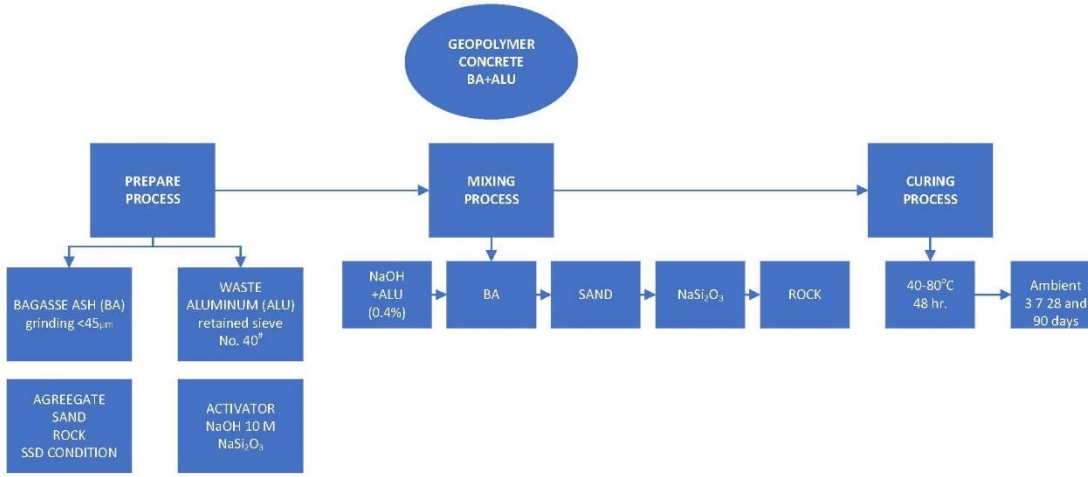
3.7 วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

3.7.1 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา จากรูปที่ 9 แสดงการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ขั้นตอนแรกผสมเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาร้อยละ 5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนักของเถ้าชานอ้อย จนเข้ากัน 2.5 นาที ขั้นตอนที่สองเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เตรียมไว้เทลงผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลา 2.5 นาที ขั้นตอนที่สามเติมทรายลงไปผสมอีก 2.5 นาที ขั้นตอนที่สี่เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ผสมต่ออีก 2.5 นาที และขั้นตอนสุดท้ายเติมหินลงไปผสมต่อไปอีก 2.5 นาที ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน เสร็จแล้วนำมาทดสอบหาค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C 143/C 143M หลังจากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 12390-2:2000 และแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 109



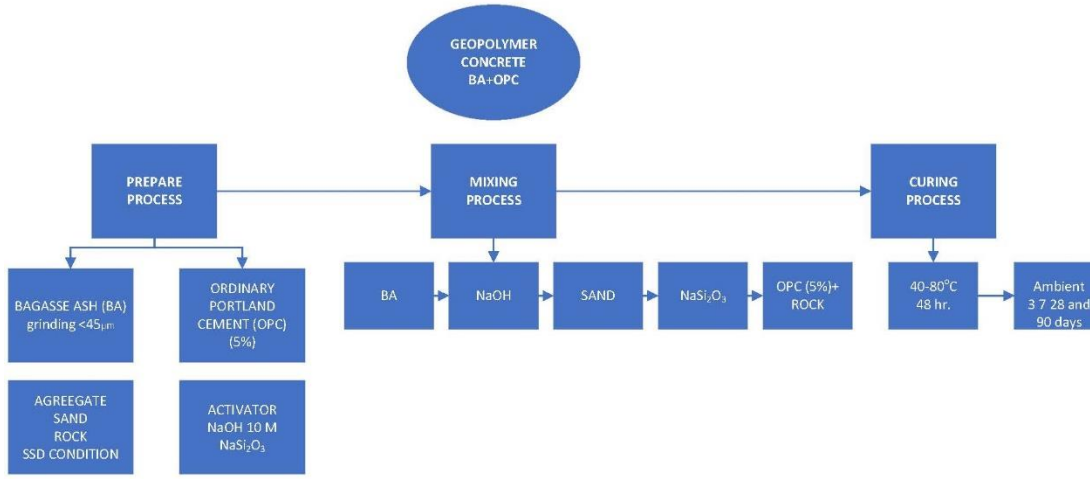
รูปที่ 9 *ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา*

3.7.2 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม จากรูปที่ 10 แสดงขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ขั้นตอนแรกเติมเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักของเถ้าชานอ้อย โดยนำไปเติมใส่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ให้ทำปฏิกิริยาประมาณ 15 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระเหยออกเข้าไปให้มีปริมาณเท่าเดิม ขั้นตอนที่สองนำไปผสมกับเถ้าชานอ้อยจนเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลา 2.5 นาที ขั้นตอนที่สามเติมทรายลงไปผสมอีก 2.5 นาที ขั้นตอนที่สี่เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ผสมต่ออีก 2.5 นาที และขั้นตอนสุดท้ายเติมหินลงไปผสมอีก 2.5 นาที ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันนำมาทดสอบหาค่าการยุบตัว หลังจากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร



รูปที่ 10 *ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียม*

3.7.3 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จากรูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ขั้นตอนแรกนำเถ้าชานอ้อยใส่ลงในเครื่องผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลา 2.5 นาที เติมทรายลงไปผสมอีก 2.5 นาที เมื่อวัสดุผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงไปในเครื่องผสมเข้ากันอีก 2.5 นาที และขั้นตอนสุดท้ายเติมหินลงไปโดยใช้ระยะเวลาผสมอีก 2.5 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน นำมาทดสอบหาค่าการยุบตัว หลังจากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร



รูปที่ 11 *ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์*

3.7.4 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยเติมสารผสมเพิ่มประเภท ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Super plasticizer) Type F และG ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ถึง 5 ของน้ำหนักเถ้าชานอ้อย สมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494 โดยขั้นตอนการผสมดำเนินการตามขั้นตอนของการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และขั้นตอนสุดท้ายเติมสารผสมเพิ่มซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ลงไปใช้ระยะเวลาผสมอีก 2.5 นาที ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำมาทดสอบหาค่าการยุบตัว เสร็จแล้วเทใส่ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

3.8 การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้านต่าง ๆ

3.8.1 การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump test) ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับวัดค่าการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 เมื่อผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสร็จแล้วนำไปใส่ลงในกรวยมาตรฐาน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กัน ทำการกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง จากนั้นค่อยๆ ดึงกรวยขึ้นอย่างช้าๆ แล้ววัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต และจดบันทึกค่า

3.8.2 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength testing) ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นการทดสอบแบบทำลายโดยการหล่อ และบ่มตัวอย่างเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-192/C 192M การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตจะต้องอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วทำการ Capping ผิวด้านบนตัวอย่างให้เรียบในกรณีตัวอย่างทรงกระบอก แล้ววางตัวอย่างบนแท่นเครื่องทดสอบให้อยู่ตรงกลาง ทำการกดตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วที่ 0.15 ถึง 0.35 เมกะปาสคาลต่อวินาที ตามมาตรฐาน ASTM C-39/C39M จนกระทั่งตัวอย่างพังเสียหาย ทำการบันทึกค่าแรงกด และบันทึกรูปแบบการพัง

เสียหายของตัวอย่าง แล้วทำการคำนวณหากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้ค่าแรงกดหารด้วยหน้าตัดการรับแรงของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$F = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ F คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)

P_{max} คือ ค่าแรงกดสูงสุด (กิโลกรัม) และ

A คือ พื้นที่รับแรงกดของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

ทดสอบตัวอย่างที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 300 ตัน (Universal testing machine) โดยใช้ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ดังแสดงรูปที่ 12

รูปที่ 12 *การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบ UTM*

3.8.3 การซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ดำเนินการทดสอบการซึมผ่านน้ำ (Water permeability testing) เป็นการทดสอบการซึมผ่านที่สามารถใช้ของเหลวแทรกซึมเข้าไปในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เพื่อเป็นการพิจารณาปัจจัยที่มีต่อความคงทนของคอนกรีต การที่คอนกรีตยอมให้มีการแทรกซึมสูงของวัสดุอย่างรุนแรง เช่น คลอไรด์ และซัลเฟต เป็นต้น จะส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อน และส่งผลให้คอนกรีตแตกจากการขยายตัว และกำลังอัดลดลง ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร นำมาตัดตามขวางที่บริเวณกึ่งกลางความสูงให้ได้ความสูง 4 เซนติเมตร ตัดให้ได้ 3 ตัวอย่างต่อก้อน ดังแสดงในรูปที่ 13 แล้วนำมาหล่อด้วยอีพ๊อกซี่รอบๆ ให้มีความหนา 2.5 เซนติเมตร

ทิ้งให้แข็งตัวในอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ทำการติดตั้งใส่ลงในชุดทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 14 ทดสอบโดยการอัดน้ำให้ผ่านตัวอย่างที่ความดัน 1 บาร์ และจดบันทึกค่าจนกว่าการซึมผ่านจะคงที่ และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \qquad (3.2)$$

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (เมตร/วินาที)

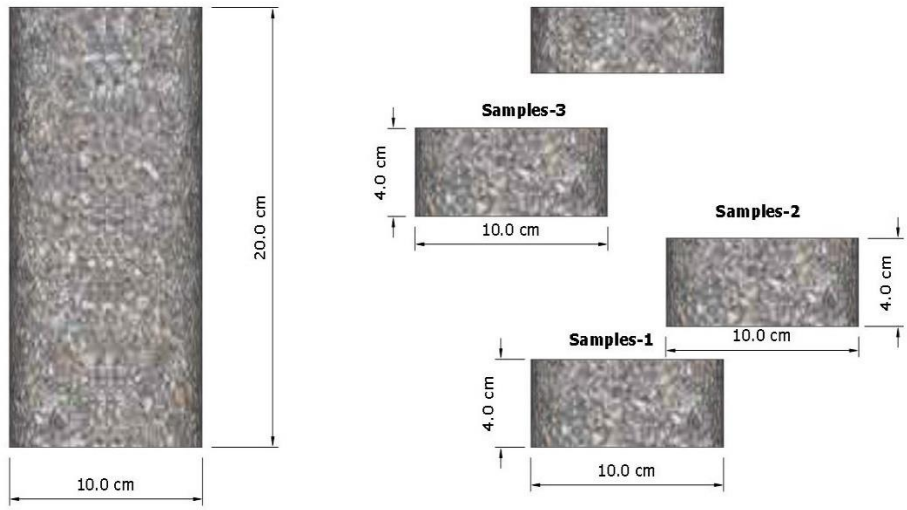
ρ คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

g คือ ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที^{2})

Q คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

P คือ ค่าความดันน้ำสัมบูรณ์ (กิโลกรัมเมตร/ตารางเมตร) และ

A คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ (ตารางเมตร)



รูปที่ 13 *การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต*

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

รูปที่ 14 *ชุดเครื่องมือการทดสอบการซึมผ่านน้ำ*

3.8.4 การทดสอบการต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion resistance of concrete testing) ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต คือ การทดสอบความคงทนต่อการขัดสีของคอนกรีต การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ดำเนินการทดสอบตามาตรฐาน ASTM C1138 (Under water method) ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปชั่งในอากาศหลังจากแช่น้ำอย่างน้อย 48 ชั่วโมง แล้วนำไปติดตั้งในเครื่องทดสอบการสึกกร่อนใต้น้ำโดยด้านบนของตัวอย่างมีลูกเหล็กที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.3 มิลลิเมตร 19 มิลลิเมตร และ12.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 15 และทำการติดตั้งใส่ลงในชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 16 หาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทดสอบโดยวัดที่มุมขวาแล้วทำการชั่งน้ำหนัก นำตัวอย่างวางในเครื่องทดสอบใส่ลูกเหล็กและเติมน้ำเริ่มทำการทดสอบ ทุก ๆ 12 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำตัวอย่างออกมาหาน้ำหนักโดยการชั่งในน้ำและในอากาศ จนครบ 72 ชั่วโมง แล้วทำการคำนวณการปริมาตรของตัวอย่าง การคำนวณปริมาตรที่สูญเสีย และคำนวณค่าเฉลี่ยความลึกของการขัดสี ดังแสดงในสมการที่ 3.3 ถึง 3.5 ตามลำดับ

$$V_t = \frac{W_{air} - W_{water}}{Gw} \tag{3.3}$$

เมื่อ V_t คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (ลูกบาศก์เมตร)

W_{air} คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (กิโลกรัม)

W_{water} คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (กิโลกรัม)

G_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

$$VL_t = V_i - V_t \tag{3.4}$$

เมื่อ VL_t คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ที่สูญเสียโดยการขัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

V_i คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ก่อนการทดสอบการขัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

และ

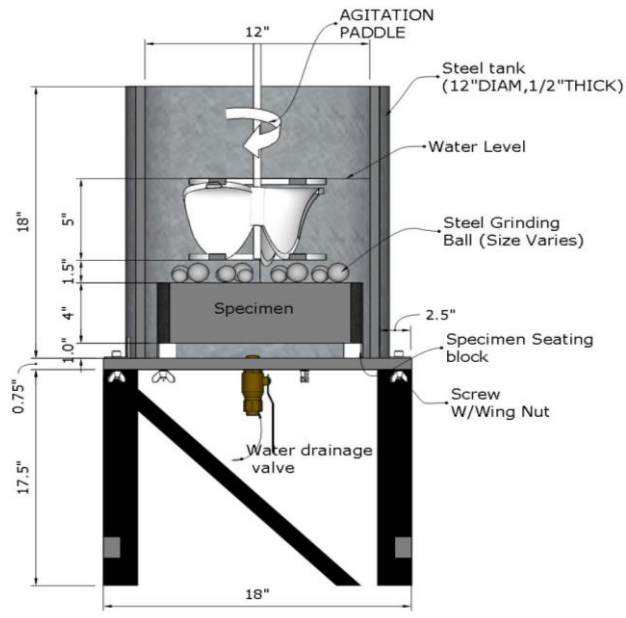
V_t คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ที่หลังการทดสอบการขัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

$$ADA_t = VL_t / A \tag{3.5}$$

เมื่อ ADA_t คือ ค่าเฉลี่ยความลึกของการขัดสี (เมตร)

VL_t คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ที่สูญเสียโดยการขัดสี (ลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดด้านบนของตัวอย่าง (ตารางเมตร)



รูปที่ 15 *ภาพตัดรายละเอียดชุดทดสอบการขัดสี*

รูปที่ 16 *ชุดทดสอบการการขัดสี*

3.8.5 การทดสอบการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage testing) ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ คือการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร (ASTM C157/C157M, 2014) บ่มตัวอย่างในน้ำ 72 ชั่วโมง นำขึ้นจากน้ำใช้ผ้าเช็ดให้แห้งแล้วทำการวัดค่าความยาวเริ่มต้นเพื่อใช้เปรียบเทียบ เก็บตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้อง 25±2 องศาเซลเซียส และวัดความยาวตัวอย่างที่อายุ 4 11 18 และ 25 วัน (ASTM C596, 2000) ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าความยาวทั้ง 4 ด้านเพื่อหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 17 บันทึกค่าแล้วคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแต่ละตัวอย่างในแต่ละช่วงอายุโดยการลบจากค่าความยาวเปรียบเทียบเริ่มต้น

รูปที่ 17 *ชุดทดสอบหดตัวเมื่อแห้ง ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์*

3.8.6 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ใช้วิธีการทดสอบด้วยเข็มไวแคต เตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยการผสมเถ้าชานอ้อยกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามอัตราส่วน และหาระยะการก่อตัวโดยการนำเข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ปล่อยอย่างอิสระลงไปในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมกับสารละลาย

หลังจากผสมเสร็จ 30 นาที และทดสอบทุกๆ 15 นาที หรือยืดเวลาออกไปเพื่อให้เพียงพอต่อระยะห่างของการทดสอบที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ตัวอย่างทดสอบจะถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบจนกระทั่งเข็มจมลงน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร ในการทดสอบให้ทดสอบห่างจากจุดเดิมไม่น้อยกว่า 6.4 มิลลิเมตร และ 9.5 มิลลิเมตร จากขอบด้านในของวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 18 ตามมาตรฐาน ASTM C191-19 และจดบันทึกค่าการจมของเข็มไวแคต พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับระยะการจมของเข็มไวแคตเพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

รูปที่ 18 *การทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์*

ตารางที่ 6 *สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (kg)	WWS (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Sand (kg)	CA (kg)	Weight (kg/m^3)
A0.60WWS7.5-60	379	31	123	123	570	1,229	2,455
A0.55WWS7.5-60	379	31	113	113	577	1,243	2,455
A0.50WWS7.5-60	379	31	105	105	582	1,254	2,455
A0.60WWS5.0-60	390	21	123	123	570	1,229	2,455
A0.55WWS5.0-60	390	21	113	113	577	1,243	2,455
A0.50WWS5.0-60	390	21	105	105	582	1,254	2,455
B0.70WWS7.5-60	379	31	149	149	554	1,193	2,455
B0.65WWS7.5-60	379	31	135	135	563	1,218	2,455
B0.60WWS7.5-60	379	31	123	123	570	1,229	2,455
B0.70WWS5.0-60	390	21	149	149	554	1,193	2,455
B0.65WWS5.0-60	390	21	135	135	563	1,212	2,455
B0.60WWS5.0-60	390	21	123	123	570	1,229	2,455

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ

ตารางที่ 7 *สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม บ่มที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (kg)	ALU (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Sand (kg)	CA (kg)	Weight (kg/m^3)
A0.60ALU0.4-40	408	2	123	123	570	1,229	2,455
A0.55ALU0.4-40	408	2	113	113	577	1,242	2,455
A0.50ALU0.4-40	408	2	105	105	582	1,253	2,455
A0.60ALU0.4-60	408	2	123	123	570	1,229	2,455
A0.55ALU0.4-60	408	2	113	113	577	1,242	2,455
A0.50ALU0.4-60	408	2	105	105	582	1,253	2,455
A0.60ALU0.4-80	408	2	123	123	570	1,229	2,455
A0.55ALU0.4-80	408	2	113	113	577	1,242	2,455
A0.50ALU0.4-80	408	2	105	105	582	1,253	2,455
C0.60ALU0.4-60	408	2	123	123	570	1,229	2,455
C0.55ALU0.4-60	408	2	113	113	577	1,242	2,455
C0.50ALU0.4-60	408	2	105	105	582	1,253	2,455

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ

ตารางที่ 8 *สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา บ่มที่อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (kg)	WWS (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Sand (kg)	CA (kg)	Weight (kg/m^3)
A0.60WWS7.5-100	379	31	123	123	570	1,229	2,455
A0.55WWS7.5-100	379	31	113	113	577	1,242	2,455
A0.50WWS7.5-100	379	31	105	105	582	1,253	2,455
A0.60WWS7.5-80	379	31	123	123	570	1,229	2,455
A0.55WWS7.5-80	379	31	113	113	577	1,242	2,455
A0.50WWS7.5-80	379	31	105	105	582	1,253	2,455
A0.60WWS7.5-60	379	31	123	123	570	1,229	2,455
A0.55WWS7.5-60	379	31	113	113	577	1,242	2,455
A0.50WWS7.5-60	379	31	105	105	582	1,253	2,455
A0.60WWS7.5-40	379	31	123	123	570	1,229	2,455
A0.55WWS7.5-40	379	31	113	113	577	1,242	2,455
A0.50WWS7.5-40	379	31	105	105	582	1,253	2,455

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ

ตารางที่ 9 *สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บ่มที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (kg)	OPC (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Sand (kg)	CA (kg)	Weight (kg/m^3)
A0.60OPC5.0-40	390	21	123	123	570	1,228	2,455
A0.55OPC5.0-40	390	21	113	113	577	1,242	2,455
A0.50OPC5.0-40	390	21	105	105	582	1,253	2,455
A0.60OPC5.0-60	390	21	123	123	570	1,228	2,455
A0.55OPC5.0-60	390	21	113	113	577	1,242	2,455
A0.50OPC5.0-60	390	21	105	105	582	1,253	2,455
A0.60OPC5.0-80	390	21	123	123	570	1,228	2,455
A0.55OPC5.0-80	390	21	113	113	577	1,242	2,455
A0.50OPC5.0-80	390	21	105	105	582	1,253	2,455

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ

ตารางที่ 10 *สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Sand (kg)	CA (kg)	Weight (kg/m^3)
A Control-0.60	410	123	123	570	1,229	2,455
A Control-0.55	410	113	113	577	1,242	2,455
A Control-0.50	410	105	105	582	1,253	2,455

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ

ตารางที่ 11 *สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ควบคุมสำหรับทดสอบการสึกกร่อนและการซึมผ่านน้ำ บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA/OPC (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Water (kg)	Sand (kg)	CA (kg)	Weight (kg/m^3)
A BA-control	410	113	113	-	577	1,242	2,455
A OPC-concrete	410	-	-	226	577	1,242	2,455
A Pan-control	410	113	113	113	577	1,242	2,455
A Pan-OPC	410	-	-	226	577	1,242	2,455

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ

ตารางที่ 12 *สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยสำหรับทดสอบการหดตัวเมื่อแห้ง บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (g)	WWS (g)	ALU (g)	OPC (g)	NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)	Sand (g)
A Control	723	-	-	-	184	184	1,026
A Best WWS	687	36	-	-	184	184	1,026
A Best ALU	720	-	3	-	184	184	1,026
A Best OPC	687	-	-	36	184	184	1,026

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ Best=สัดส่วนผสมที่ดีสุด

ตารางที่ 13 *สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เถ้าชานอ้อยสำหรับทดสอบการก่อตัว ที่บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (g)	WWS (g)	ALU (g)	OPC (g)	NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)
A Control	650	-	-	-	163	163
A Best WWS	618	32.50	-	-	163	163
A Best ALU	648	-	3	-	163	163
A Best OPC	618	-	-	33	163	163

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ Best=สัดส่วนผสมที่ดีสุด

ตารางที่ 14 *สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับมวลรวมหยาบต่างชนิด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

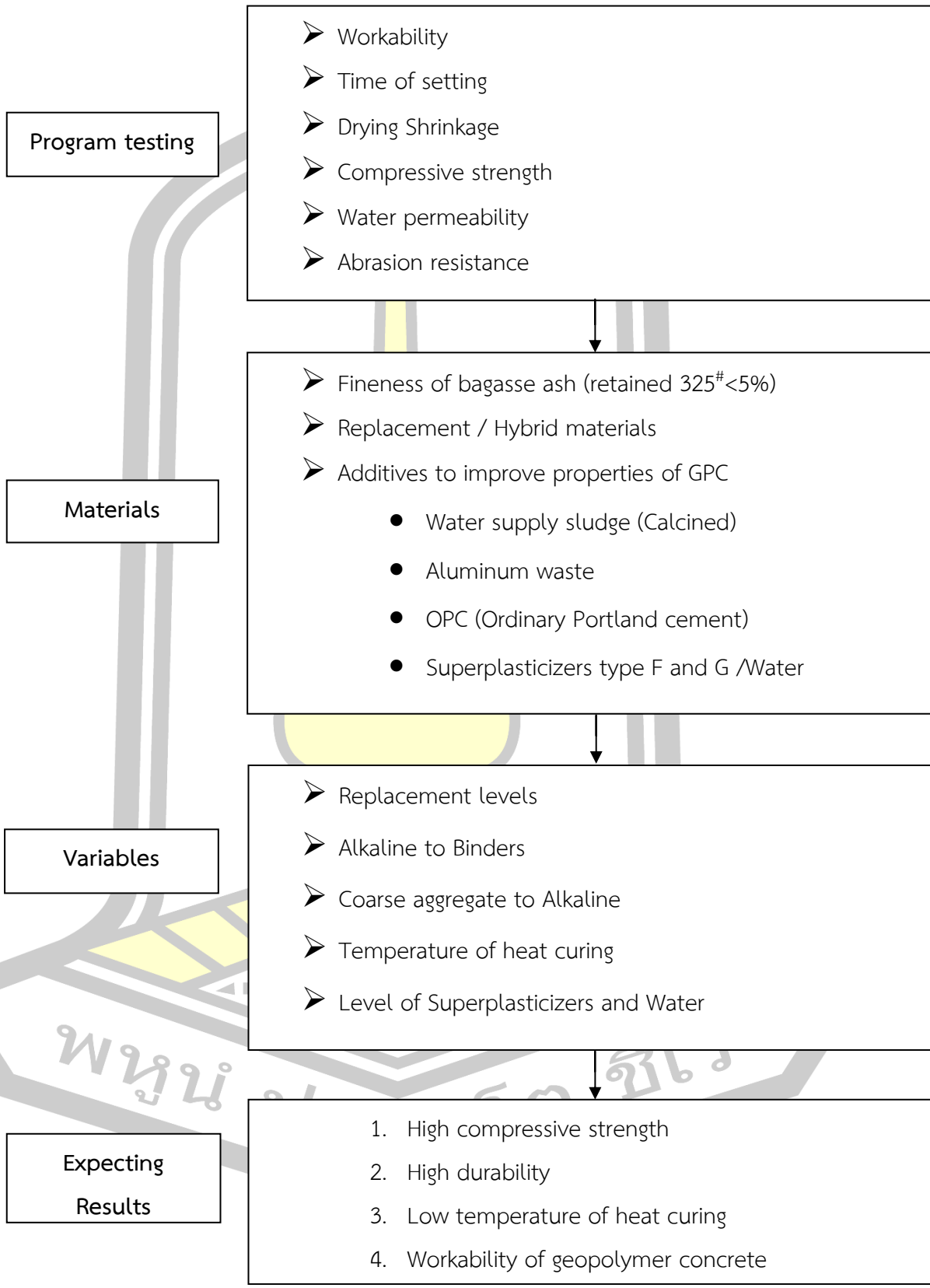
Mix Code name.	BA (kg)	WWS (kg)	ALU (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Sand (kg)	CA (kg)
A0.6WWS7.5-60	379	31	-	123	123	570	1,229
B0.6WWS7.5-60	379	31	-	123	123	570	1,229
A0.6ALU0.4-60	408	-	2	123	123	570	1,229
C0.6ALU0.4-60	408	-	2	123	123	570	1,229

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ

ตารางที่ 15 *สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสำหรับทดสอบค่าการยุบตัว บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

Mix Code name.	BA (kg)	SP (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Sand (kg)	CA (kg)	Weight (kg/m^3)
BA-SP1F	410	4	113	1123	577	1,242	2,459
BA-SP3F	410	12	113	113	577	1,242	2,467
BA-SP5F	410	21	113	113	577	1,242	2,476
BA-SP1G	410	4	113	1123	577	1,242	2,459
BA-SP3G	410	12	113	113	577	1,242	2,467
BA-SP5G	410	21	113	113	577	1,242	2,476
BA-W1	410	4	113	1123	577	1,242	2,459
BA-W3	410	12	113	113	577	1,242	2,467
BA-W3	410	21	113	113	577	1,242	2,476

A=หินปูน B=หินบะซอลต์โพรงข่าย C=กรวดแม่น้ำ SP=สารลดน้ำพิเศษ



รูปที่ 19 *โปรแกรมการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุเหลือทิ้ง*

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของเถ้าชานอ้อย วัสดุอื่นที่ผสมเถ้าชานอ้อย และสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย ซึ่งจะรายงานผลและเสนอในบทนี้

4.1 สมบัติของเถ้าชานอ้อยและวัสดุอื่นที่ผสมเถ้าชานอ้อย

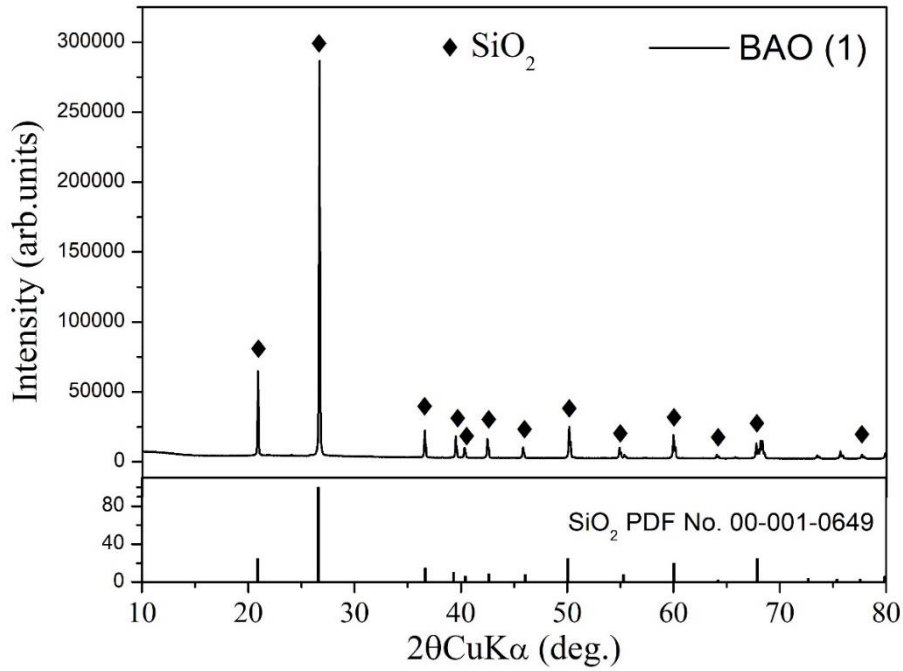
4.1.1 การทดสอบหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย (BA) และตะกอนน้ำประปาเผา (WWS) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบ XRF (X-Ray Fluorescence) ดังแสดงในตารางที่ 16 จะเห็นได้ว่าเถ้าชานอ้อยมีปริมาณซิลิกาคอนข้างสูงแต่มีอะลูมินาต่ำเมื่อเทียบกับตะกอนน้ำเผาจะเห็นได้ว่าตะกอนน้ำประปาเผามีอะลูมินามากกว่าเถ้าชานอ้อยอย่างเห็นได้ชัดเจน

ตารางที่ 16 *ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผา*

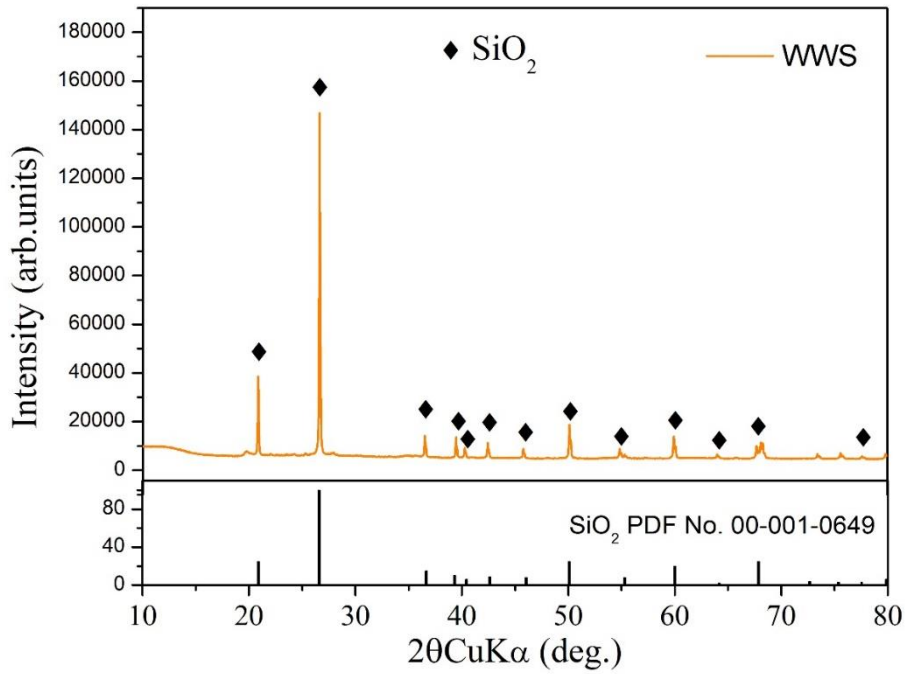
Description	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	SO_3	LOI
BA	77.57	4.15	3.00	3.72	3.08	0.80	11.94
WWS	45.50	27.37	11.85	1.81	3.56	0.71	-

4.1.2 การทดสอบหาค่าองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผา ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบ XRD (X-Ray Diffraction) พบว่าเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผามีค่า Peak ของซิลิกาที่ช่วง 21 ถึง 27 2θ (Souza et al., 2011) มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) แบบกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ดังแสดงในรูปที่ 20 และ 21 ตามลำดับ

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว



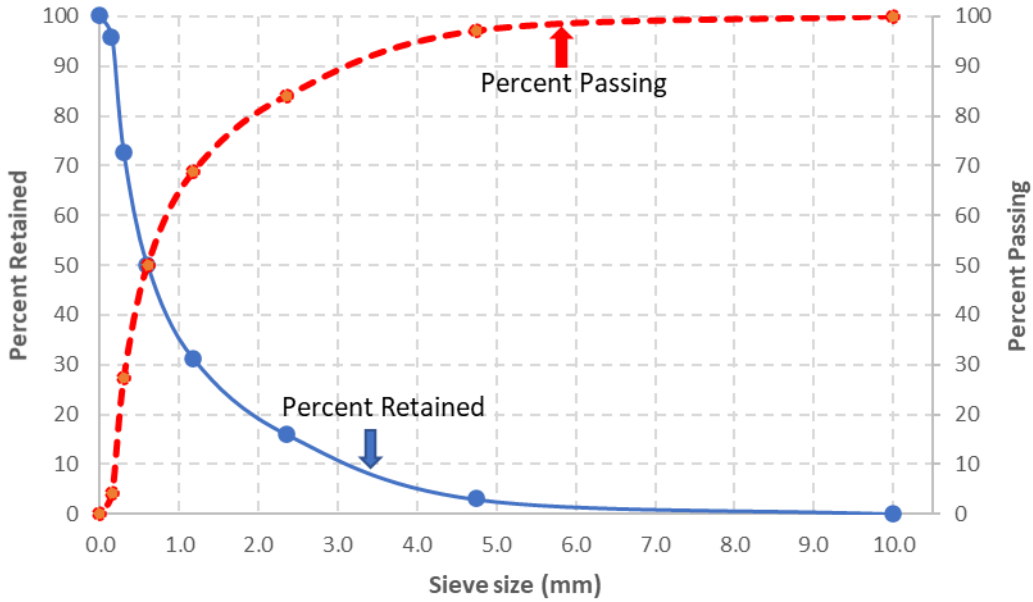
รูปที่ 20 *องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าชานอ้อย*



รูปที่ 21 *องค์ประกอบทางแร่ของตะกอนน้ำประปาเผา 600 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง*

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยก่อนบด และหลังบดมีค่าเท่ากับ 1.79 และ 2.18 ตามลำดับ ผลจากการบดทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 ค่าการดูดซึมน้ำ ความ

ถ่วงจำเพาะ และค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทรายมีค่าเท่ากับ 0.86 2.64 และ 2.68 ตามลำดับ จากรูปที่ 22 แสดงให้เห็นผลการทดสอบการกระจายตัวของทรายที่มีขนาดค่อนข้างหยาบอยู่ในเกณฑ์ระหว่าง 2.30 ถึง 3.20 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีต ผลการทดสอบของมวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย) มีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมเท่ากับ 2.70 และ 0.50 ตามลำดับ มวลรวมหยาบชนิด B (หินบะซอลต์โพรงข่าย) มีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมเท่ากับ 2.86 และ 2.15 ตามลำดับ และมวลรวมหยาบชนิด C (หินกรวด) มีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมเท่ากับ 2.63 และ 1.73 ตามลำดับ ผลการทดสอบค่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Los Angeles สำหรับมวลรวมหยาบชนิด A B และ C เท่ากับ 26.50 19.70 และ 28.72 ตามลำดับ



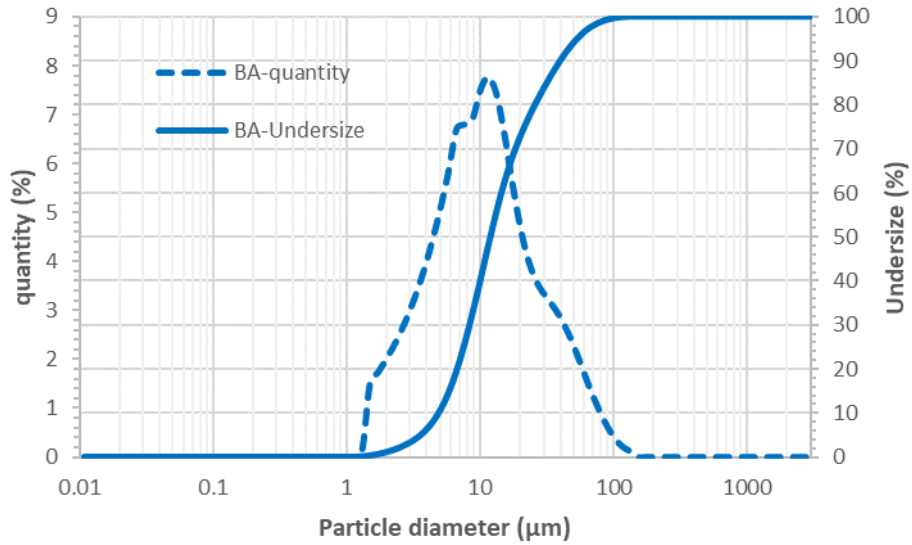
รูปที่ 22 *ขนาดคละของทราย*

4.1.4 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเผา โดยใช้ Laser Diffraction Particle Analysis ยี่ห้อ HORIBA รุ่น LA-950V2 จากตารางที่ 17 ผลการทดสอบพบว่าการกระจายตัวของเถ้าชานอ้อย มีขนาดอนุภาค D10 D50 และ D90 เท่ากับ 5 12 และ 40 ไมครอน ตามลำดับ โดยมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 12 ไมครอน และมีความกว้างของการกระจายตัว เท่ากับ 35 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 23 และตะกอนน้ำประปาเผา มีขนาดอนุภาค D10 D50 และ D90 เท่ากับ 2 15 และ 65 ไมครอน ตามลำดับ โดยมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 15 ไมครอน และมีความกว้างของการกระจายตัว เท่ากับ 63 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 24 จากผล

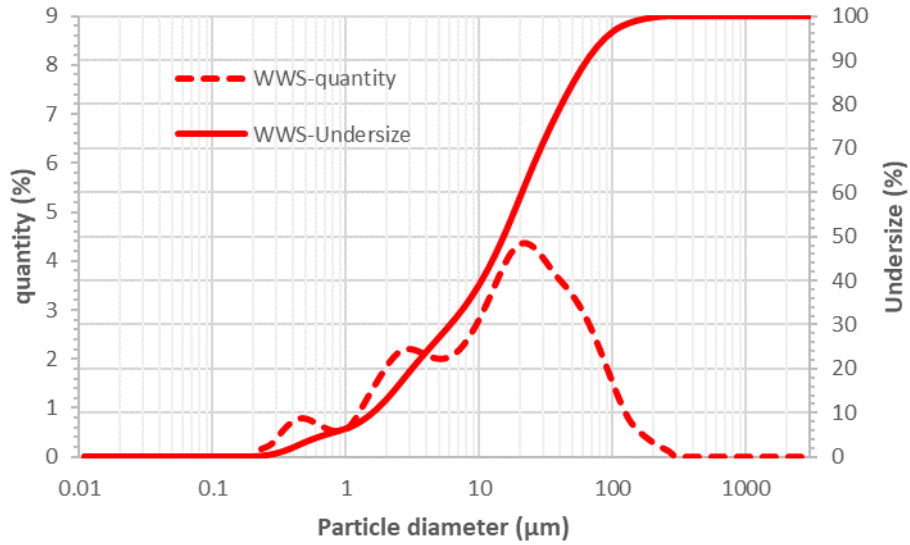
การวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าอนุภาคของเถ้าชานอ้อยมีขนาดเล็กกว่าตะกอนน้ำประปาเผา เท่ากับ 3 ไมครอน ซึ่งน้อยกว่าเถ้าชานอ้อยไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความแข็งของตะกอนน้ำประปาเผาจึงทำให้การบดต้องใช้ระยะเวลาและน้ำหนักของลูกเหล็กมากกว่าในการบดให้อนุภาคของตะกอนน้ำประปาเผามีขนาดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5

ตารางที่ 17 *การกระจายตัวของอนุภาคเถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา*

Description	D_{mean} (µm)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
BA	18	5	12	40
WWS	26	2	15	65

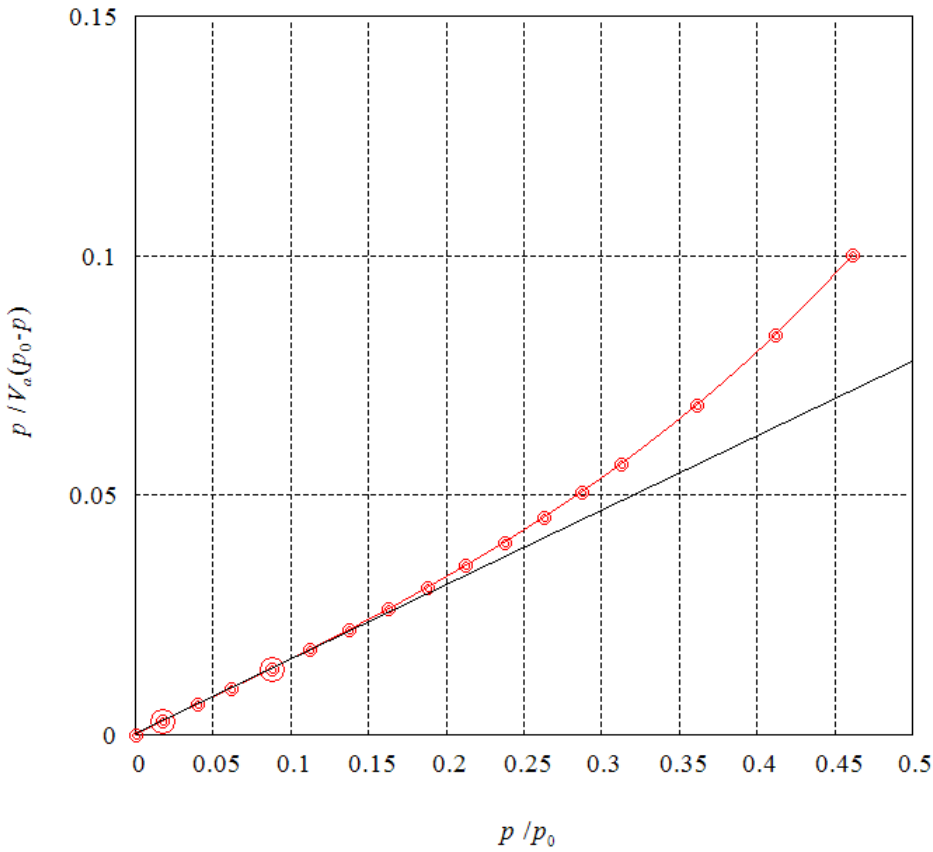


รูปที่ 23 *การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าชานอ้อย*



รูปที่ 24 *การการกระจายตัวของขนาดอนุภาคตะกอนน้ำประปาเผา*

Belsorp Adsorption/Desorption Data Analysis Software - Ver 6.1.0.4 BEL Japan, Inc.



BET-Plot

Adsorptive N2

Adsorption temperature 77 [K]

◎Sugar cane FA.DAT

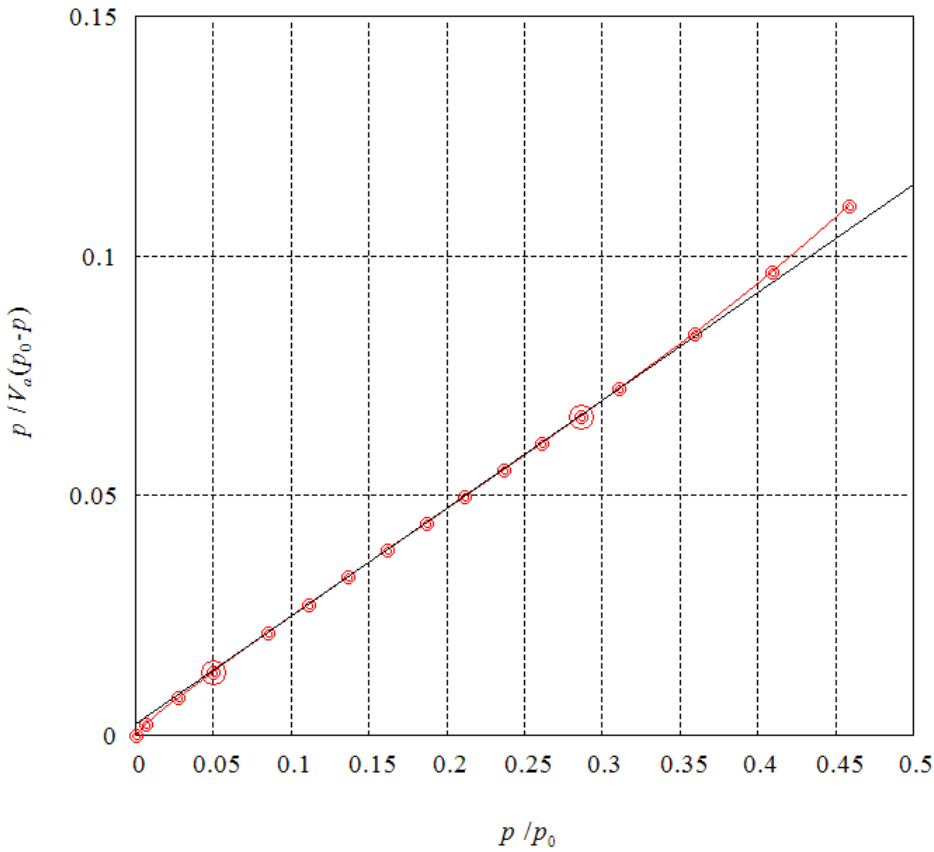
NS7695/62
Sujittra
degas 300 degee C 3h

Sample weight	0.1695	[g]	Date of measurement	19/10/08	
Saturated vapor pressure	99.242	[kPa]	Time of measurement	12:11:41	

V_m	6.4297	[cm^3(STP) g^{-1}]	$a_{s,BET}$	2.7985E+01	[m^2 g^{-1}]
C	722.30		Total pore volume(p/p_0=0.990)	3.2911E-02	[cm^3 g^{-1}]
Mean pore diameter	4.7040	[nm]			

รูปที่ 25 *พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของเถ้าชานอ้อย*

Belsorp Adsorption/Desorption Data Analysis Software - Ver 6.1.0.4 BEL Japan, Inc.



BET-Plot

Adsorptive N2

Adsorption temperature 77 [K]

slugde1.DAT

NS7694/62
Sujittra
degas 300 degee C 3h

Sample weight	0.1587	[g]	Date of measurement	19/10/10	
Saturated vapor pressure	99.111	[kPa]	Time of measurement	15:46:07	

V_m	4.4023	[cm^3(STP) g^{-1}]	$a_{s,BET}$	1.9161E+01	[m^2 g^{-1}]
C	99.298		Total pore volume(p/p_0=0.990)	0.1144	[cm^3 g^{-1}]
Mean pore diameter	23.873	[nm]			

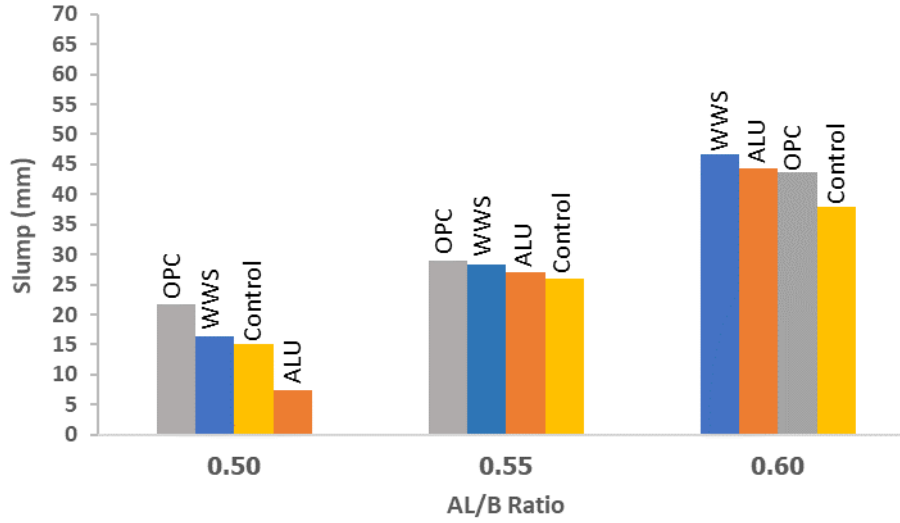
รูปที่ 26 *พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตะกอนน้ำประปาเผา 600˚C 2 ชั่วโมง*

4.1.5 การทดสอบความละเอียดโดยวิธีร่อนน้ำผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ของเถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา จากการทดสอบพบว่ามีอนุภาคค้างร้อยละ 4.14 และ 4.85 ตามลำดับ

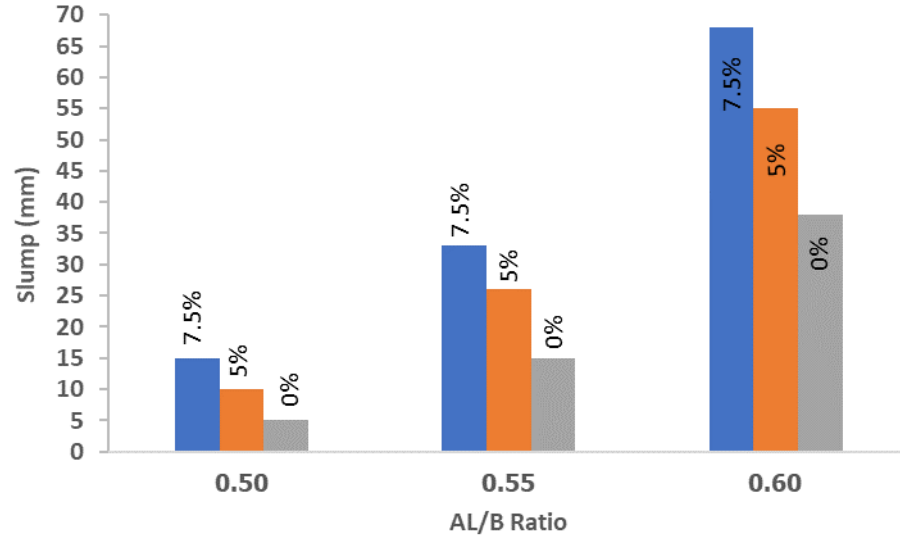
4.1.6 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area pore size and Pore volume distribution analyzer (BET) เป็นการใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน ด้วยเครื่องมือทดสอบ ยี่ห้อ Bel-Japan รุ่น Bel Sorp mini II ผลพบว่าเถ้าชานอ้อยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 28 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 5 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 25 ในส่วนของตะกอนน้ำประปาเผาพบว่ามีพื้นที่ผิวเท่ากับ 19 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 24 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 26 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเถ้าชานอ้อยมีพื้นที่ผิวที่มากกว่าและขนาดโดยเฉลี่ยของรูพรุนเล็กกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน

4.2 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยคอนกรีต จากรูปที่ 27 จะเห็นได้ว่าค่าการยุบตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) ที่สูง (Nuruddin et al., 2011) ของทุกสัดส่วนผสม ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ในคอนกรีตทั่วไป (Patankar et al., 2013) จากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.60 ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่ผสมตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 มีค่าการยุบตัวสูงสุด โดยรองลงมา คือ เศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 กลับพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่ผสมปูนซีเมนต์มีค่าการยุบตัวสูงสุด รองลงมาคือ ตะกอนน้ำประปา เศษอะลูมิเนียม และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่ผสมปูนซีเมนต์ยังคงมีค่าการยุบตัวสูงสุด รองลงมาคือ ตะกอนน้ำประปาเผา จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม และเศษอะลูมิเนียม ตามลำดับ จากผลการทดสอบค่าการยุบตัวจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ AL/B ที่ลดต่ำลง ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่ผสมปูนซีเมนต์กลับมีค่าสูงกว่าส่วนผสมอื่นๆ อาจเนื่องจากอนุภาคของปูนซีเมนต์มีรูปร่างลักษณะที่กลมมากกว่าจึงส่งผลให้มีความลื่นไหลที่ดีกว่าเมื่ออัตราส่วนของ AL/B ลดต่ำลง อีกทั้งในขั้นตอนการผสมจะผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงไปในส่วนผสมเป็นส่วนสุดท้ายก่อนเติมมวลรวมหยาบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



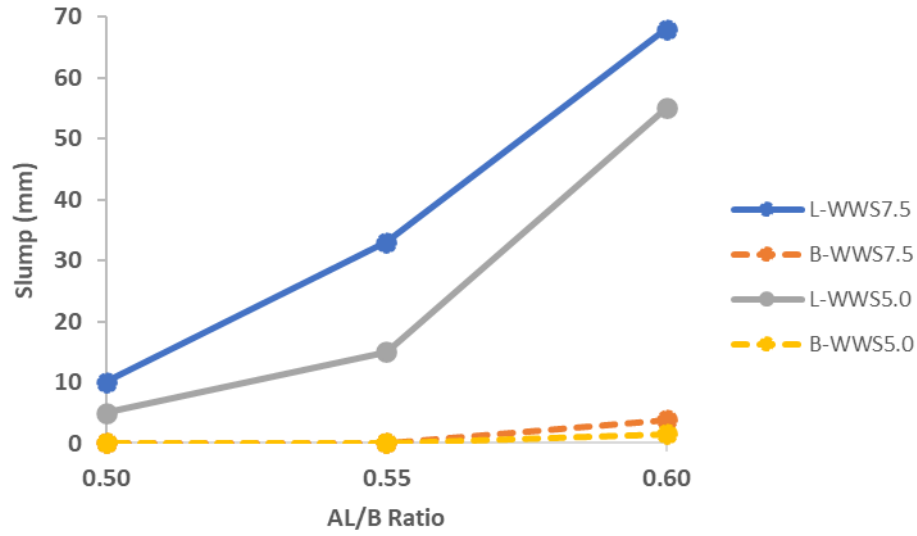
รูปที่ 27 *ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยกับการแทนที่วัสดุตั้งต้นแตกต่างกัน*



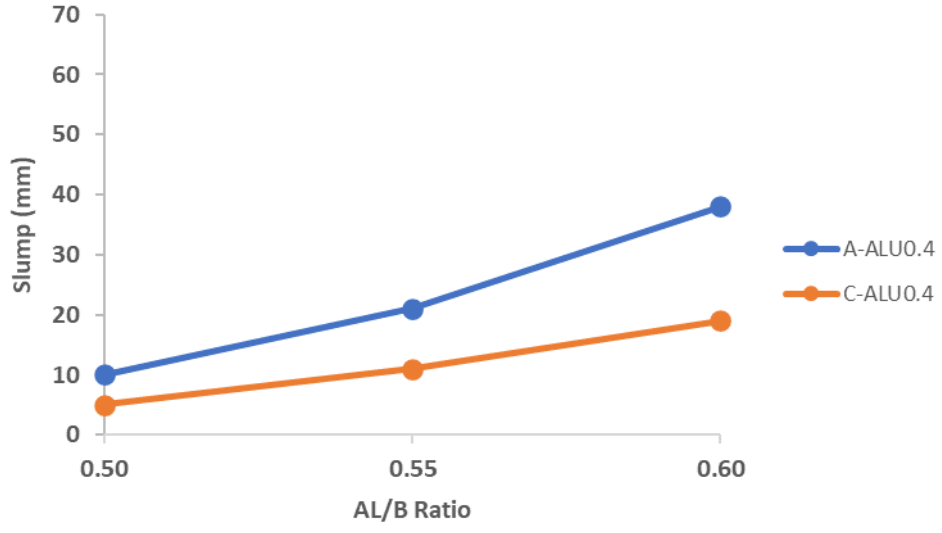
รูปที่ 28 *ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยกับการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาอัตราส่วนร้อยละที่แตกต่างกัน*

เมื่อพิจารณาในส่วนของจีโอโพเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผาในอัตราส่วนร้อยละที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 28 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.60 ค่าการยุบตัวสูงขึ้นตามร้อยละการแทนที่ของตะกอนน้ำประปาเผาเนื่องจากอนุภาคของตะกอนน้ำประปาเผามีรูปร่างค่อนข้างกลมกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยจึงส่งผลต่อค่าการยุบตัวที่ดีกว่า เมื่อแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 ส่วนอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 และ0.50 พบว่าการแทนที่ของ

ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 มีค่าการยุบตัวมากกว่าร้อยละ 5 สอดคล้องกับผลการทดสอบ BET ที่พบว่าพื้นที่ผิวของตะกอนน้ำประปาเผานั้นมีค่าน้อยกว่าเถ้าชานอ้อยดังนั้นเมื่อแทนที่ลงไปจะช่วยให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต้องการน้ำลดลงส่งผลดีต่อค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าเมื่ออัตราส่วนของ AL/B ลดลงส่งผลให้ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม และการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผา มีแนวโน้มลดต่ำลงทุกอัตราส่วนผสม



รูปที่ 29 *ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปากับมวลรวมหยาบต่างชนิดกัน*

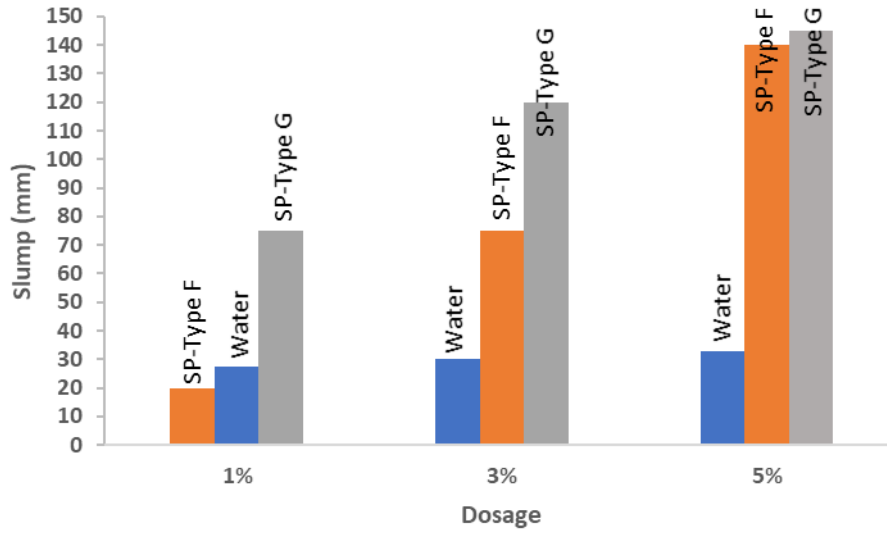


รูปที่ 30 *ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียมกับมวลรวมหยาบต่างชนิด*

ผลของการทดสอบค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผาที่ใช้มวลรวมหยาบต่างชนิดกันจากรูปที่ 29 แสดงให้เห็นว่ามวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย) มีค่าการยุบตัวสูงสุดของทุกอัตราส่วนของ AL/B ส่วนมวลรวมหยาบชนิด B (หินบะซอลต์โพรงข่าย) พบว่ามีความสามารถในการทำงานได้ต่ำในทุกอัตราส่วนของ AL/B อย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อเทียบกับอัตราส่วนของ AL/B เดียวกัน อาจเนื่องจากผิวของมวลรวมหยาบชนิด B มีความพรุนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากระหว่างที่ลาวาเย็นตัวลงก๊าซที่อยู่ภายในผุดออกมาทำให้โครงสร้างภายในเป็นโพงข่าย (McCoy et al., 2006) จึงมีค่าการดูดซึมน้ำที่มาก ส่งผลทำให้มวลรวมหยาบชนิด B เมื่อนำไปใช้เป็นมวลรวมหยาบก็จะทำให้มีการดึงเอาน้ำจากสารละลายส่วนหนึ่งไป และประกอบกับลักษณะแบนของมวลรวมหยาบชนิด B จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าการยุบตัวที่ต่ำส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการทำงานได้อย่างชัดเจน

ผลของการทดสอบค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ใช้มวลรวมหยาบต่างชนิดกัน จากรูปที่ 30 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของ AL/B ที่สูงส่งผลต่อค่าการยุบตัวที่สูงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบทั้ง 2 ชนิด และพบว่ามวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย) ให้ค่าการยุบตัวที่สูงกว่ามวลรวมชนิด C (หินกรวด) ทุกอัตราส่วนของ AL/B เนื่องจากมวลรวมหยาบชนิด C มีขนาดที่เล็กผลของลักษณะผิวจึงไม่มีผลต่อการยุบตัวที่เพิ่มขึ้นโดยลักษณะที่กลมมนทำให้มวลรวมชนิด C สามารถแซกตัวเข้าไปในช่องว่างมากกว่าทำให้มีปริมาณค่อนข้างมาก จึงส่งผลต่อค่าการยุบตัวที่ต่ำซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Echeta et al., 2013) ประกอบกับความหนืดของสารละลายที่ส่งผลโดยตรงกับค่ายุบตัวที่เป็นปัจจัยหลัก จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการทำงานได้ที่ต่ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบชนิด C

สารลดน้ำพิเศษชนิดซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizers) และน้ำ ที่มีผลต่อค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยคอนกรีตที่อัตราส่วนของ AL/B เท่ากับ 0.55 โดยทำการเติมสารลดน้ำพิเศษชนิดซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ 2 ประเภท ได้แก่ F และ G และทำการเพิ่มน้ำเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานได้ โดยเพิ่มเข้าไปในอัตราส่วนร้อยละ 1 3 และ 5 ของน้ำหนักเถ้าชานอ้อย จากรูปที่ 31 แสดงให้เห็นว่าสารลดน้ำพิเศษประเภท G ให้ค่าการยุบตัวสูงสุดทุกอัตราส่วน ยกเว้นร้อยละ 5 ส่วนประเภท F ให้ค่ายุบตัวสูงสุดที่ร้อยละ 5 ในกรณีของการเติมน้ำแสดงให้เห็นว่าทุกอัตราส่วนส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้เล็กน้อย และพบว่าสารลดน้ำพิเศษสามารถปรับปรุงความสารมารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้นแต่กำลังอัดกลับลดลงตามค่าการยุบตัวที่สูงขึ้น ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Kong & Sanjayan, 2010) จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสารลดน้ำพิเศษชนิดซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ มีผลต่อการชะละลายอิออนของซิลิกาและอลูมินาในสารตั้งต้น ซึ่งส่งผลโดยตรงกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Songpiriyakij et al., 2010)



รูปที่ 31 *ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยกับร้อยละของสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน*

4.3 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์

ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เถ้าชานอ้อยควบคุม บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และจีโอโพลิเมอร์เพสต์แทนที่วัสดุตั้งต้นด้วย ตะกอนน้ำประปาร้อยละ 7.5 เศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.4 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทุกอัตราส่วนผสมในอุณภูมิปกติมีระยะเวลาการก่อตัวมากกว่า 24 ชั่วโมง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา Geopolymerization ที่ช้าในอุณหภูมิต่ำ (Swanepoel & Strydom, 2002) จากรูปที่ 32 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการบ่มจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยา Geopolymerization ให้เร็วขึ้น (Nath & Sarker, 2014) ส่งผลทำให้อัตราการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับการบ่มที่สภาพแวดล้อมของอุณหภูมิทั่วไป

จากตารางที่ 18 ผลการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 พบว่ามีระยะการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายเท่ากับ 65 และ 120 นาที ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวเร็วกว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุมถึงร้อยละ 40 และเมื่อเทียบกับการแทนที่ด้วยวัสดุอื่นๆ ยังพบอีกว่ามีระยะเวลาของการก่อตัวเร็วสุดทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย เนื่องจากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งมีความร้อนจึงส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน จากตารางที่ 19 พบว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุมมีระยะการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายเท่ากับ 105 และ 210 นาที ตามลำดับ จากตารางที่ 20 พบว่าการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาร้อยละ 7.5 มีระยะเวลาการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายเท่ากับ 159 และ 294 นาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์ควบคุมพบว่ามี

ระยะเวลาการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายนานถึงร้อยละ 33 และ 40 ตามลำดับ และจากตารางที่ 21 ผลของการแทนที่ด้วยเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 มีระยะเวลาการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายเท่ากับ 205 และ 345 นาที ตามลำดับ เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุมพบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายนานถึงร้อยละ 75 และ 39 ตามลำดับ และหากพิจารณาอัตราส่วน Si/Al ที่ลดลง พบว่าระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน (Yaseri et al., 2017) ยกเว้นเติมปูนซีเมนต์

ตารางที่ 18 *ผลการทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5*

Setting time of Geopolymer BA+OPC 60°C				
Mixing time	**Time at test**	**Total time after mixing (Min)**	**Penetration in 30 sec (mm)**	**Remark**
10:20 AM	10:50 AM	30	40	
	10:55 AM	36	38	
	11:01 AM	42	35	
	11:07 AM	47	33	
	11:13 AM	53	30	
	11:18 AM	59	28	
	11:24 AM	65	25	initial
	11:30 AM	70	23	
	11:36 AM	76	20	
	11:41 AM	82	18	
	11:47 AM	88	15	
	11:53 AM	93	13	
	11:59 AM	99	10	
	12:05 PM	105	8	
	12:20 PM	120	0	final

ตารางที่ 19 *ผลการทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ ควบคุม*

Setting time of Geopolymer Control 60°C				
Mixing time	Time at test	Total time after mixing (Min)	Penetration in 30 sec (mm)	Remark
9:30 AM	10:00 AM	30	40	
	10:10 AM	41	39	
	10:21 AM	51	36	
	10:32 AM	62	34	
	10:42 AM	73	32	
	10:53 AM	84	29	
	11:04 AM	94	27	
	11:15 AM	105	25	initial
	11:25 AM	116	22	
	11:36 AM	126	20	
	11:47 AM	137	17	
	11:57 AM	148	15	
	12:08 PM	159	13	
	12:19 PM	169	10	
	12:30 PM	180	8	
	12:45 PM	195	3	
	1:00 PM	210	0	final

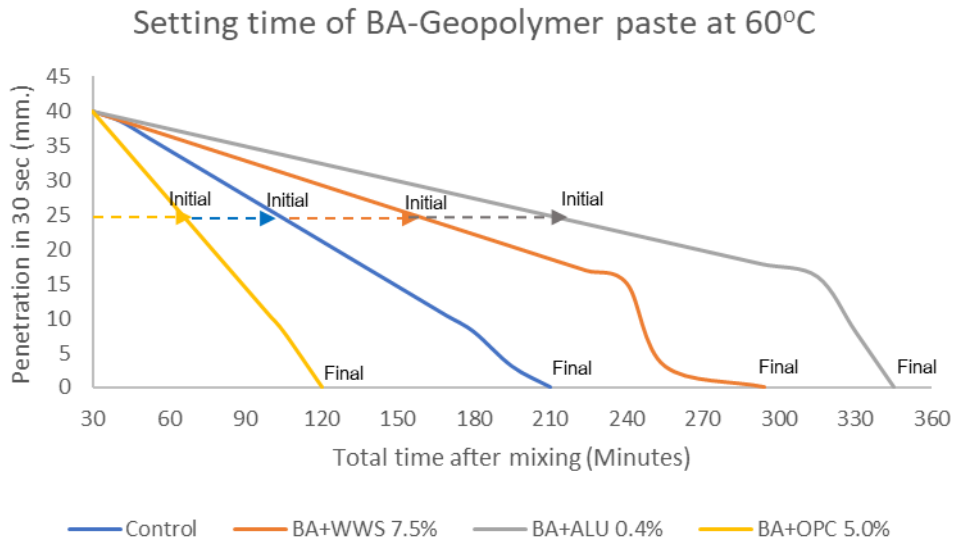
ตารางที่ 20 *ผลการทดสอบการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ แทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5*

Setting time of Geopolymer BA+WWS7.5 60˚C				
Mixing time	**Time at test**	**Total time after mixing (Min)**	**Penetration in 30 sec (mm)**	**Remark**
12:00 AM	12:30 PM	30	40	
	12:46 AM	46	38	
	1:02 AM	62	36	
	1:18 AM	78	34	
	1:34 AM	95	32	
	1:50 AM	111	30	
	2:06 AM	127	28	
	2:23 AM	143	27	
	2:39 AM	159	25	initial
	2:55 AM	175	23	
	3:11 AM	192	21	
	3:27 AM	208	19	
	3:43 AM	224	17	
	4:00 AM	240	15	
	4:15 AM	255	3	
	4:54 AM	294	0	final

พหูน ปณ ฑิโต ชีว

ตารางที่ 21 *ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยเพสต์ แทนที่ด้วยเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4*

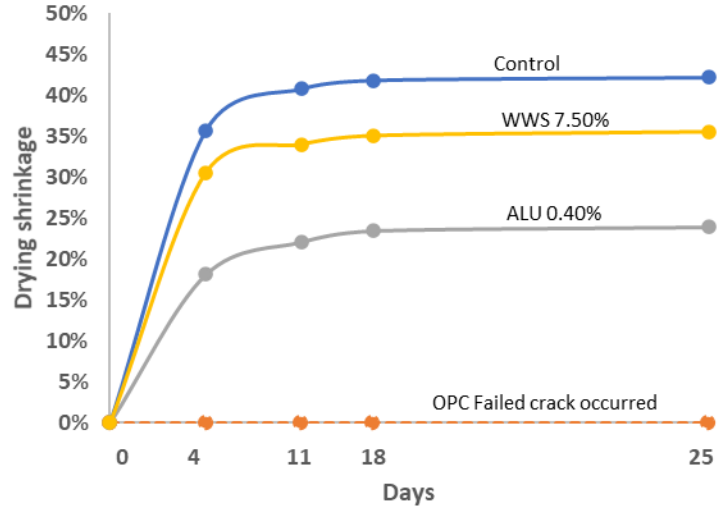
Setting time of Geopolymer BA+ALU 60˚C				
Mixing time	**Time at test**	**Total time after mixing (Min)**	**Penetration in 30 sec (mm)**	**Remark**
9:40 AM	10:10 AM	30	40	
	12:51 AM	52	38	
	1:13 AM	74	36	
	1:35 AM	96	34	
	1:57 AM	118	33	
	2:19 AM	140	31	
	2:41 AM	162	29	
	3:03 AM	183	27	
	3:25 AM	205	25	initial
	3:47 AM	227	23	
	4:09 AM	249	22	
	4:31 AM	271	20	
	4:53 AM	293	18	
	5:15 AM	315	16	
	5:30 AM	330	8	
	5:45 AM	345	0	final



รูปที่ 32 *ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เถ้าชานอ้อยที่แทนที่วัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน*

4.4 การหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าชานอ้อย

ค่าการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าชานอ้อย บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทำการวัดระยะของตัวอย่างที่อายุ 4 11 18 และ 25 วัน จากรูปที่ 33 แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มการหดตัวสูงขึ้นตามอายุของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น (Lee et al., 2014) จากตารางที่ 22 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมมีการหดตัวสูงสุดถึงร้อยละ 42 จากระยะวัดตัวอย่างเริ่มต้นจนถึงอายุ 25 วัน เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ส่วนตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 มีค่าการหดตัวเมื่อแห้งร้อยละ 36 ในส่วนของเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 พบว่ามีค่าการหดตัวเมื่อแห้งร้อยละ 24 และพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าชานอ้อยที่แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรอยร้าวและแตกออกจากกันจึงไม่สามารถวัดค่าการหดตัวเมื่อแห้งได้ และเมื่อเทียบกับการหดตัวเมื่อแห้งของมอร์ต้าร์ทั่วไปพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าการหดตัวมากกว่าทุกอัตราส่วนการแทนที่ของวัสดุตั้งต้น ซึ่งผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Lee et al., 2014)



รูปที่ 33 *การหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ถ้าชานอ้อยที่แทนที่วัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน*

ตารางที่ 22 *ผลการทดสอบค่าการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าชานอ้อย*

Drying shrinkage (mm.), (%)					
Mix No.	Start length	4 Day	11 Day	18 Day	25 Day
Control	8.78 (100)	5.65 (36)	5.20 (41)	5.11 (42)	5.08 (42)
OPC 5.00%	8.78 (100)	Failed crack occurred			
ALU 0.40%	8.67 (100)	7.10 (18)	6.76 (22)	6.64 (23)	6.60 (24)
WWS 7.50%	7.23 (100)	5.02 (30)	4.77 (34)	4.70 (35)	4.66 (35)

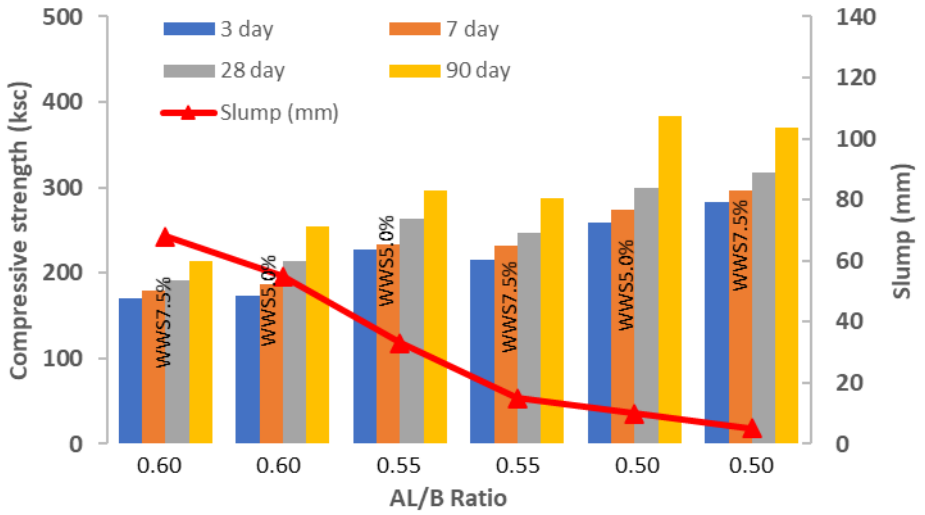
4.5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

4.5.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 และ 7.5 โดยน้ำหนักเถ้าชานอ้อย และใช้มวลรวมหยาบ 2 ชนิด ได้แก่ ชนิด A (หินปูนย่อย) และชนิด B (หินบะซอลต์โพรงข่าย) บ่มที่อุณภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 23 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการทดสอบของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Mishra et al., 2008) อัตราส่วนของ AL/B ที่ลดลงส่งผลต่อกำลังอัดที่สูงขึ้นของทุกสัดส่วนผสม ในทางกลับกันเมื่ออัตราส่วน CA/AL สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น จากรูปที่ 34 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 7.5 ให้กำลังสูงสุดที่อายุทดสอบ 90 วัน เท่ากับ 384 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อลดการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาลงเป็นร้อยละ 5 กลับพบว่ากำลังอัดช่วง 28 วัน ดีกว่าร้อยละการแทนที่ 7.5 โดยหากพิจารณาการผสมด้วยมวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย) ผลกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 3 7 และ90 วัน นั้นพบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 80-90 90-95

และ110-120 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่อายุ 28 วัน และหากพิจารณาผลของมวลรวมหยาบชนิด B (หินบะซอลต์โพรงข่าย) จะเห็นได้ว่าผลกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 3 7 และ90 วัน นั้นมีค่าความแปรปรวนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกับตัวอย่างที่อายุ 28 วัน จากรูปที่ 35 แสดงให้เห็นว่ามวลรวมหยาบชนิด B มีความต้องการน้ำจากสารละลายเพื่อไปเคลือบผิวมาก เนื่องจากพื้นผิวมีความพรุนมากกว่าเมื่อเทียบกับมวลรวมหยาบชนิด A ส่งผลให้ต้องเพิ่มอัตราส่วน AL/B เพื่อให้มีความสามารถในการทำการได้ และทำให้ส่วนผสมไม่แห้งจนเกินไป แต่เมื่อเพิ่มอัตรา AL/B กลับพบว่ากำลังอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเทียบกันกับมวลรวมหยาบชนิด A ที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.60 ที่การแทนที่ตะกอนน้ำประปาร้อยละ 5 และ 7.5 พบว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบชนิด B มีกำลังอัดลดลงมากถึงร้อยละ 65 และ 66 ตามลำดับ รูปที่ 35 แสดงให้เห็นว่าค่าการยุบตัวที่ต่ำของมวลรวมชนิด B ไม่ได้ส่งผลต่อกำลังอัดที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนแต่กลับส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้อย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นได้นำสัดส่วนผสมของการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 มาผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 24 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ AL/B ที่ลดลง กำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 40 และ60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุของตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มขึ้น ในช่วงต้นกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีการพัฒนากำลังค่อนข้างช้าอาจเนื่องปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันต้องการอุณหภูมิที่สูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นอายุ (Rovnaník, 2010) ส่วนการบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการพัฒนากำลังสอดคล้องกับคอนกรีตทั่วไป และมีกำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 สูงถึง 354 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร จากรูปที่ 36 แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ผลการทดสอบของตัวอย่างที่อุณหภูมิการบ่ม 80 และ100 องศาเซลเซียส กลับพบว่ามีกำลังอัดสูงที่อายุ 3 วัน และลดลงที่อายุ 7 วัน (Gluth et al., 2013) กำลังอัดที่ลดลงนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิการบ่มที่สูงจะนำไปสู่การระเหยของน้ำในเจล อย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการหดตัว และเกิดการแตกร้าวซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Khan et al., 2019) เมื่ออุณภูมิการบ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดโพลงขนาดใหญ่และมีปริมาณโพรงที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลเสียต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ (Gluth et al., 2013) และหลังจาก 7 วัน กำลังอัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงอายุ 90 วัน

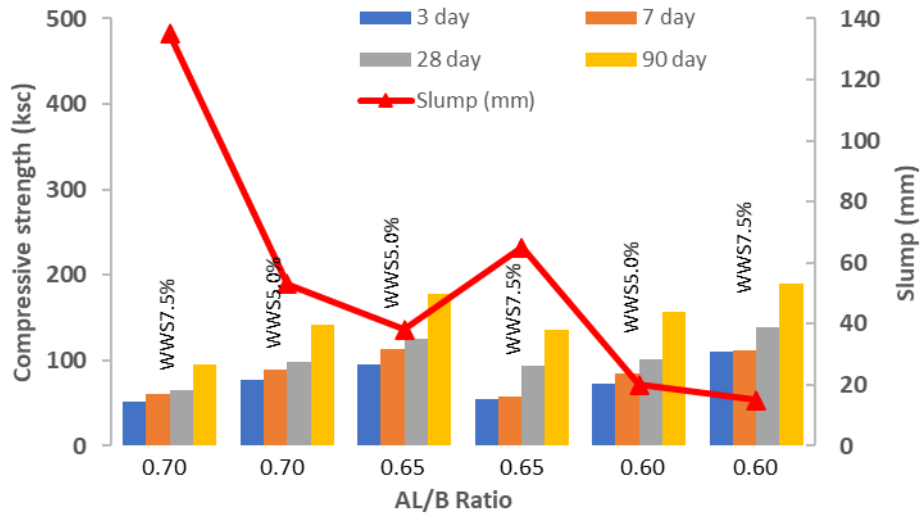
ตารางที่ 23 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Mixed Code name.	WWS (%)	CA/AL Ratio	Strength (ksc), *(%)*			
			3 day	7 day	28 day	90 day
A0.60WWS7.5-60	7.5	5.0	171 *(90)*	179 *(94)*	191 *(100)*	213 *(112)*
A0.55WWS7.5-60	7.5	5.5	227 *(86)*	233 *(89)*	263 *(100)*	297 *(113)*
A0.50WWS7.5-60	7.5	6.0	259 *(84)*	273 *(90)*	300 *(100)*	384 *(132)*
A0.60WWS5.0-60	5.0	5.0	173 *(85)*	187 *(90)*	213 *(100)*	254 *(116)*
A0.55WWS5.0-60	5.0	5.5	215 *(88)*	232 *(94)*	247 *(100)*	288 *(116)*
A0.50WWS5.0-60	5.0	6.0	283 *(87)*	296 *(92)*	317 *(100)*	370 *(120)*
B0.70WWS7.5-60	7.5	4.0	51 *(79)*	61 *(94)*	65 *(100)*	96 *(148)*
B0.65WWS7.5-60	7.5	4.5	77 *(79)*	89 *(91)*	98 *(100)*	141 *(144)*
B0.60WWS7.5-60	7.5	5.0	95 *(75)*	114 *(91)*	126 *(100)*	178 *(141)*
B0.70WWS5.0-60	5.0	4.0	54 *(58)*	57 *(61)*	94 *(100)*	135 *(144)*
B0.65WWS5.0-60	5.0	4.5	73 *(72)*	85 *(84)*	101 *(100)*	157 *(155)*
B0.60WWS5.0-60	5.0	5.0	110 *(79)*	112 *(81)*	139 *(100)*	189 *(136)*
Control-0.60		5.0	117 (77)	131 (86)	153 (100)	217 (142)
Control-0.55		5.5	182 (87)	192 (91)	210 (100)	221 (105)
Control-0.50		6.0	199 (83)	226 (95)	239 (100)	274 (115)

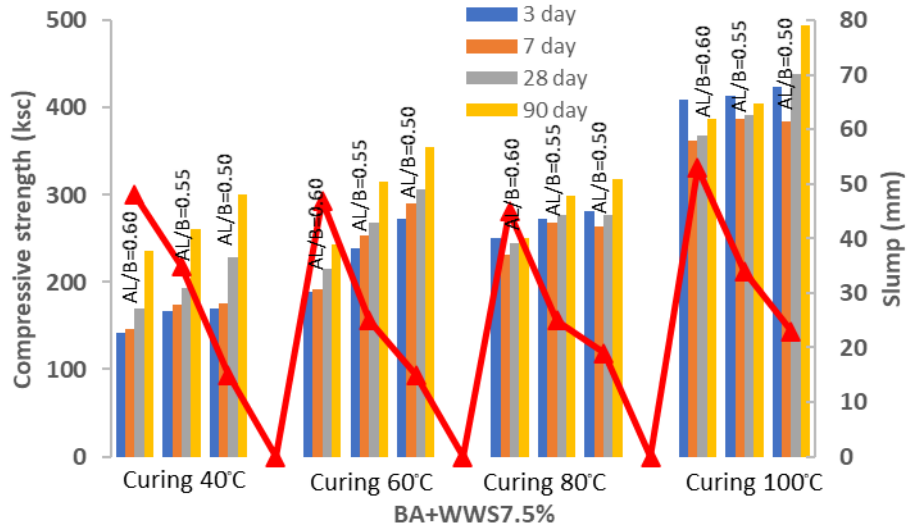


รูปที่ 34 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย)*

4.5.2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่เศษอะลูมิเนียม ในอัตราส่วนร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักเถ้าชานอ้อย จากตารางที่ 25 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุของตัวอย่างและอัตราส่วนของ CA/AL ที่สูงขึ้น ในทางกลับกันพบว่าอัตราส่วนของ AL/B ที่ลดลงส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นแต่ความสามารถในการทำงานได้ลดลง ในกรณีของการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 70-85 75-90 และ130-140 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณากำลังอัดของตัว



รูปที่ 35 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด B (หินบะซอลต์โพรงข่าย)*



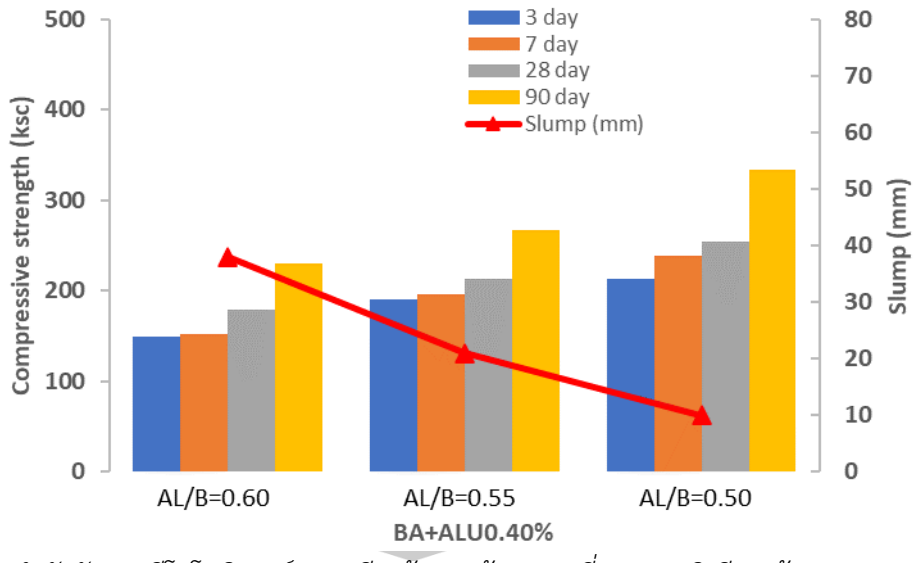
รูปที่ 36 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5 บ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน*

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา ร้อยละ 7.5 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม

Mixed Code name.	Temp.	CA/AL Ratio	Strength (ksc), *(%)*			
			3 day	7 day	28 day	90 day
0.60WWS7.5-40	40°C	5.0	142 *(84)*	147 *(87)*	170 *(100)*	235 *(138)*
0.55WWS7.5-40		5.5	166 *(86)*	174 *(90)*	194 *(100)*	260 *(134)*
0.50WWS7.5-40		6.0	171 *(75)*	175 *(76)*	229 *(100)*	300 *(131)*
0.60WWS7.5-60	60°C	5.0	189 *(88)*	191 *(89)*	215 *(100)*	244 *(114)*
0.55WWS7.5-60		5.5	239 *(89)*	253 *(94)*	269 *(100)*	315 *(117)*
0.50WWS7.5-60		6.0	273 *(89)*	290 *(95)*	306 *(100)*	354 *(116)*
0.55WWS7.5-80	80°C	5.0	250 *(103)*	232 *(95)*	244 *(100)*	251 *(103)*
0.50WWS7.5-80		5.5	272 *(98)*	269 *(97)*	277 *(100)*	299 *(108)*
0.60WWS7.5-80		6.0	282 *(102)*	263 *(95)*	277 *(100)*	318 *(115)*
0.55WWS7.5-100	100°C	5.0	410 *(111)*	362 *(98)*	368 *(100)*	387 *(105)*
0.50WWS7.5-100		5.5	414 *(106)*	387 *(99)*	391 *(100)*	405 *(104)*
0.60WWS7.5-100		6.0	424 *(97)*	384 *(88)*	438 *(100)*	494 *(113)*
Control-0.60	60°C	5.0	117 (77)	131 (86)	153 (100)	217 (142)
Control-0.55		5.5	182 (87)	192 (91)	210 (100)	221 (105)
Control-0.50		6.0	199 (83)	226 (95)	239 (100)	274 (115)

อย่างบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ90 วัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 85-90 90-95 และ110-120 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อายุ 28 วัน และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการบ่มที่ 80 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 90-105 90-95 และ105-120 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อายุ 28 วัน จากรูปที่ 37 และ38 แสดงให้เห็นว่าในส่วนกรณีของมวลรวมหยาบต่างชนิดกัน นั้นพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบชนิด C ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่ามวลรวมหยาบชนิด A ทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากมวลรวมหยาบชนิด C มีความต้องการน้ำที่สูงกว่าจึงมีการดึงเอาน้ำจากสารละลายไปเคลือบบริเวณผิวมากกว่าเมื่อเทียบกับหินปูนย่อยเนื่องจากหินกรวดมีร้อยละการดูดซึมที่มากกว่า (No & Varner, 2013) ถึงร้อยละ 1.23 เมื่อเทียบกับหินปูนย่อย ลักษณะผิวที่กลมไม่มีเหลียมมุมของมวลรวมหยาบชนิด C ยังทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเจลกับมวลรวมหยาบไม่ดีนี้ก็เป็นอีกสาเหตุ

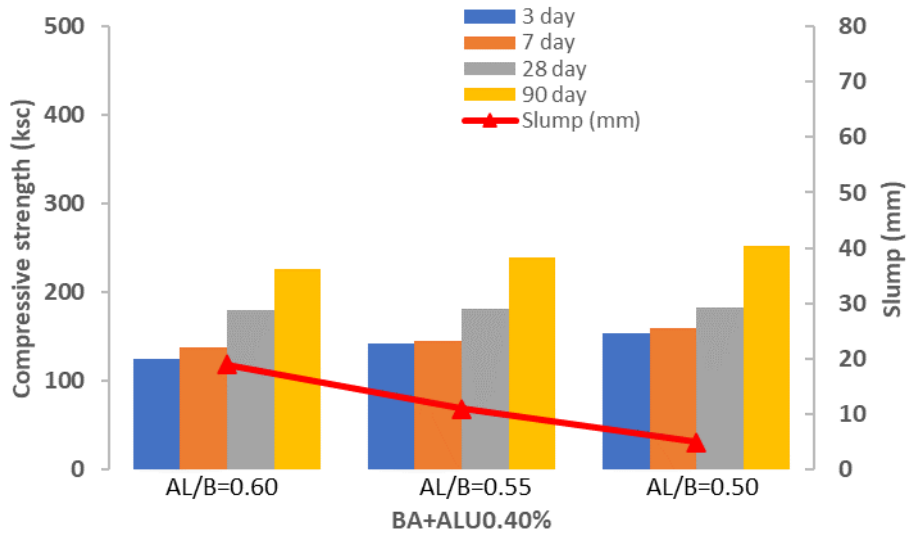
สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับมวลรวมหยาบชนิด A ซึ่งมีความเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่า และความสามารถในการทำงานได้ของมวลรวมหยาบชนิด C ที่ต่ำกว่าหินปูนย่อยนั้นกลับไม่ได้มีผลต่อกำลังอัดที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 38 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณภูมิการบ่มที่สูงขึ้นของทุกอัตราส่วน AL/B ยกเว้นบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 ที่อายุ 90 วัน พบว่าให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ถึงร้อยละ 23 และจากรูปที่ 39 แสดงให้เห็นว่าสำหรับการบ่มด้วยอุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส โดยการบ่มด้วยอุณหภูมิ 40 มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นที่อายุ 90 วัน ที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 มากกว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในกรณีการบ่มที่เพิ่มขึ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังอัดในช่วง 3 วัน นั้นมีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน (Gluth et al., 2013) เพียงเล็กน้อยและค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วน AL/B ลดลงหลังจากอายุ 7 วัน กำลังอัดกับมีแนวโน้มพัฒนาเพิ่มขึ้นอีกจนถึงอายุ 90 วัน กำลังอัดที่ลดลงนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิการบ่มที่สูงจะนำไปสู่การระเหยของน้ำในเจล อย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการหดตัวและเกิดการแตกร้าว ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Khan et al., 2019) เมื่ออุณภูมิการบ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดโพลงขนาดใหญ่และมีปริมาณโพลงที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลเสียต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ (Gluth et al., 2013) และหลังจาก 7 วัน กำลังอัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงอายุ 90 วัน ซึ่งมีผลที่เหมือนกันกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่ผสมตะกอนน้ำประปาเผา



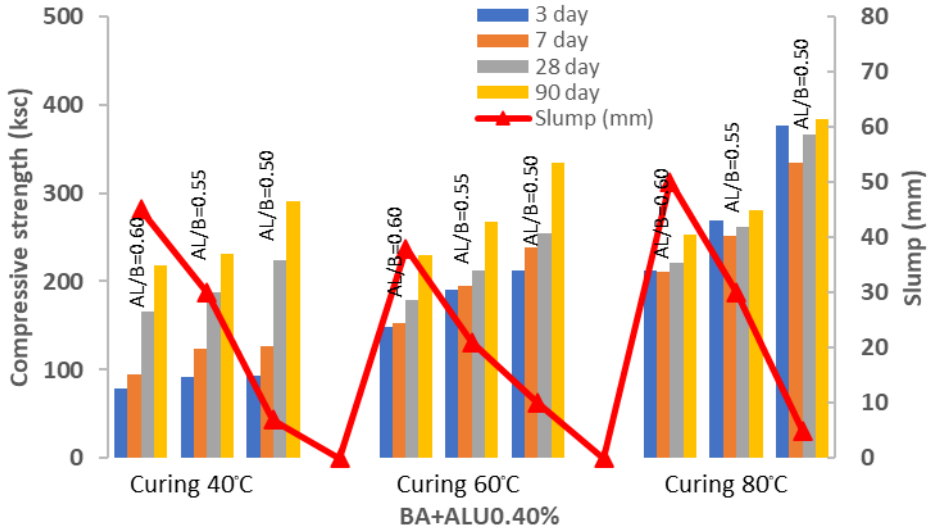
รูปที่ 37 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่เศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0.4 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด A (หินปูนย่อย)*

ตารางที่ 25 *ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 แปรผันอุณหภูมิ และมวลรวมหยาบ*

Mixed Code name.	Temp.	CA/AL Ratio	Strength (ksc), (%)			
			3 day	7 day	28 day	90 day
A0.60ALU0.4-40	40°C	5.0	79 *(48)*	94 *(57)*	166 *(100)*	219 *(132)*
A0.55ALU0.4-40		5.5	92 *(49)*	124 *(66)*	187 *(100)*	231 *(124)*
A0.50ALU0.4-40		6.0	94 *(42)*	126 *(56)*	224 *(100)*	289 *(129)*
A0.60ALU0.4-60	60°C	5.0	149 *(84)*	152 *(85)*	178 *(100)*	230 *(130)*
A0.55ALU0.4-60		5.5	190 *(89)*	196 *(92)*	213 *(100)*	267 *(125)*
A0.50ALU0.4-60		6.0	213 *(84)*	239 *(94)*	254 *(100)*	334 *(131)*
A0.60ALU0.4-80	80°C	5.0	212 *(96)*	210 *(95)*	220 *(100)*	254 *(116)*
A0.55ALU0.4-80		5.5	269 *(103)*	251 *(96)*	261 *(100)*	280 *(107)*
A0.50ALU0.4-80		6.0	376 *(103)*	334 *(91)*	366 *(100)*	383 *(105)*
Control-0.60	60°C	5.0	125 *(70)*	137 *(77)*	179 *(100)*	227 *(127)*
Control-0.55		5.5	142 *(79)*	146 *(81)*	181 *(100)*	240 *(133)*
Control-0.50		6.0	154 *(84)*	159 *(87)*	183 *(100)*	253 *(138)*



รูปที่ 38 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่เศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0.4 สำหรับมวลรวมหยาบชนิด C (หินกรวด)*



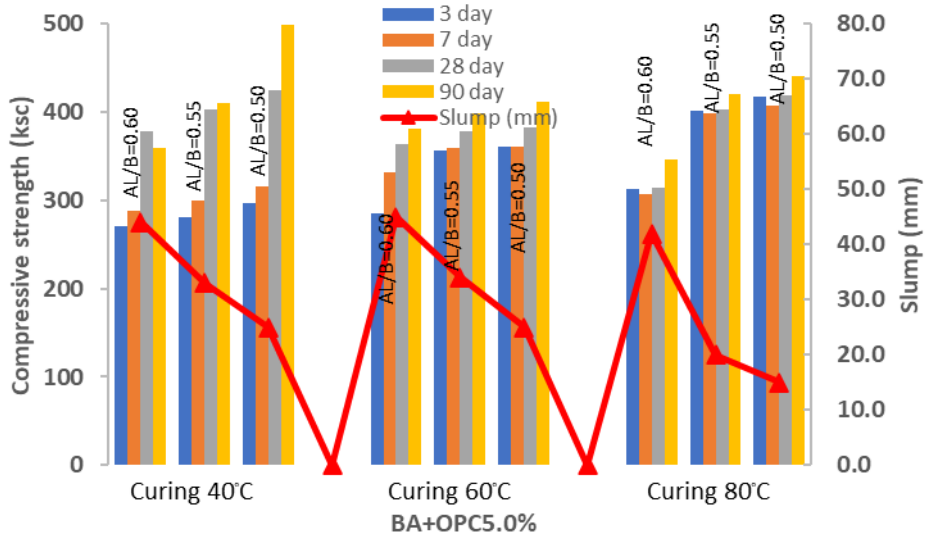
รูปที่ 39 *กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่เศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0.4 บ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน*

4.5.3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเถ้าชานอ้อย จากตารางที่ 26 พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราส่วน AL/B ที่ลดลง และอายุการทดสอบที่เพิ่มขึ้น ของทุกสัดส่วนผสม การแทนที่ปูนซีเมนต์ลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 5 นั้นชี้ให้เห็นว่ามีผลดีต่อกำลังอัดในการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยสามารถเพิ่มกำลังอัดในช่วงต้นอายุ (Pangdaeng et al., 2014) ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการแทนที่ด้วยวัสดุอื่นๆ ที่ผสมวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน CA/AL ที่สูงขึ้นเหมือนการแทนที่วัสดุอื่นๆ ในกรณีของการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 70-75 75-80 และ100-120 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณากำลังอัดของตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ90 วัน มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 75-95 90-95 และ100-110 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อายุ 28 วัน และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการบ่มที่ 80 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 95-100 95-100 และ100-110 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อายุ 28 วัน จากรูปที่ 40 แสดงให้เห็นว่าในกรณีของการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นั้นยังชี้ให้เห็นอีกว่ากำลังอัดที่ 28 และ 90 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทุกอัตราส่วนผสมอย่างชัดเจน และการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่ามีกำลังอัดสูงกว่าทุกอัตราส่วนผสมของการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ยกเว้นอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 อาจเนื่องจากการบ่มที่อุณหภูมที่ต่ำกว่า 60

องศาเซลเซียส นั้นไม่ทำให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่างไปอย่างรวดเร็วจึงทำให้ยังคงเหลือน้ำที่หลงเหลือจากสารละลายที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันแล้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำส่วนนี้จึงส่งผลดีต่อกำลังอัดทั้งในช่วงต้นและช่วงปลายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต นอกจากนี้รูปที่ 40 ยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงร้อยละ 5 บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่อายุทดสอบ 28 และ 90 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทุกอัตราส่วน AL/B ในกรณีของการทดสอบตัวอย่างที่ 90 วัน ที่อัตราส่วนของ AL/B เท่ากับ 0.50 กลับพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 499 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และจะเห็นได้ว่าค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดไม่มากนักเมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ที่อายุการทดสอบ 28 และ90 วัน

ตารางที่ 26 *ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 แปรผันอุณหภูมิ*

Mixed Code name.	Temp.	CA/AL Ratio	Strength (ksc), (%)			
			3 day	7 day	28 day	90 day
0.60OPC5.0-40	40°C	5.0	270 *(71)*	289 *(76)*	358 *(100)*	378 *(106)*
0.55OPC5.0-40		5.5	281 *(70)*	299 *(74)*	403 *(100)*	411 *(102)*
0.50OPC5.0-40		6.0	297 *(70)*	316 *(75)*	424 *(100)*	499 *(118)*
0.60OPC5.0-60	60°C	5.0	285 *(78)*	332 *(91)*	364 *(100)*	380 *(104)*
0.55OPC5.0-60		5.5	356 *(94)*	359 *(95)*	379 *(100)*	399 *(105)*
0.50OPC5.0-60		6.0	360 *(94)*	361 *(94)*	383 *(100)*	412 *(108)*
0.60OPC5.0-80	80°C	5.0	313 *(99)*	307 *(97)*	315 *(100)*	346 *(109)*
0.55OPC5.0-80		5.5	402 *(100)*	399 *(99)*	403 *(100)*	420 *(100)*
0.50OPC5.0-80		6.0	418 *(100)*	407 *(97)*	419 *(100)*	441 *(105)*
Control-0.60	60°C	5.0	117 (77)	131 (86)	153 (100)	217 (142)
Control-0.55		5.5	182 (87)	192 (91)	210 (100)	221 (105)
Control-0.50		6.0	199 (83)	226 (95)	239 (100)	274 (115)

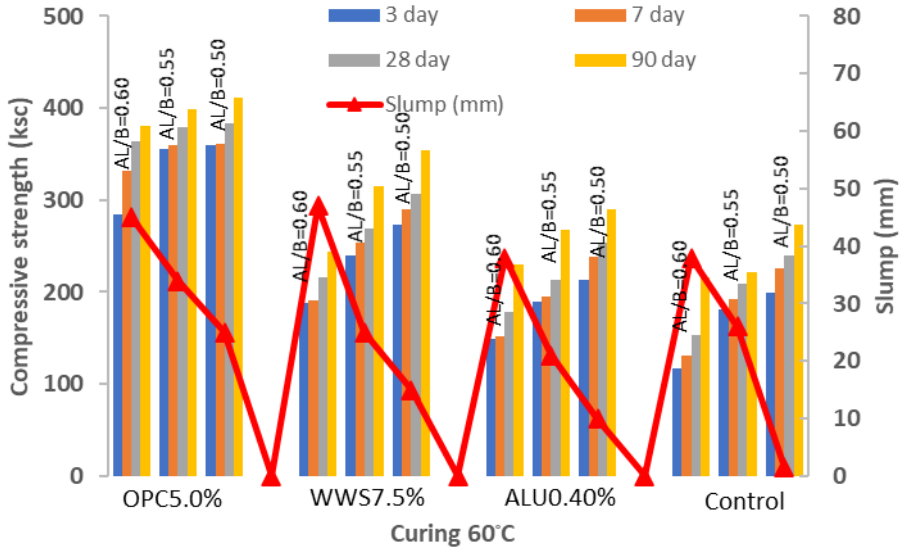


รูปที่ 40 *กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 บ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน*

ตารางที่ 27 *ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานแทนที่ด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน และบ่มที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส*

Mixed Code name.	SiO_2/Al_2O_3 Ratio	CA/AL Ratio	Strength (ksc), *(%)*			
			3 day	7 day	28 day	90 day
Control-0.60	32	5.0	117 *(77)*	131 *(86)*	153 *(100)*	217 *(142)*
Control-0.55		5.5	182 *(87)*	192 *(91)*	210 *(100)*	221 *(105)*
Control-0.50		6.0	199 *(83)*	226 *(95)*	239 *(100)*	274 *(115)*
0.60OPC5.0-60	30	5.0	285 *(78)*	332 *(91)*	364 *(100)*	380 *(104)*
0.55OPC5.0-60		5.5	356 *(94)*	359 *(95)*	379 *(100)*	399 *(105)*
0.50OPC5.0-60		6.0	360 *(94)*	361 *(94)*	383 *(100)*	412 *(106)*
0.60ALU0.4-60	29	5.0	149 *(84)*	152 *(85)*	178 *(100)*	254 *(143)*
0.55ALU0.4-60		5.5	190 *(89)*	196 *(92)*	213 *(100)*	267 *(125)*
0.50ALU0.4-60		6.0	213 *(84)*	239 *(94)*	254 *(100)*	290 *(114)*
0.60WWS7.5-60	22	5.0	189 *(88)*	191 *(89)*	215 *(100)*	244 *(113)*
0.55WWS7.5-60		5.5	239 *(89)*	253 *(94)*	269 *(100)*	315 *(117)*
0.50WWS7.5-60		6.0	273 *(89)*	290 *(95)*	306 *(100)*	354 *(116)*

4.5.4 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยควบคุม เทียบกับการแทนที่ด้วยวัสดุที่แตกต่างกันบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 27 พบว่าเถ้าชานอ้อยที่เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เมื่อถูกปรับปรุงสมบัติโดยการแทนที่ของตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 เศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 ทำให้อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 และอัตราส่วนของ AL/B ลดลงส่งผลต่อกำลังอัดที่มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกสัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม จะสังเกตุเห็นได้ว่าอัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 ของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในเถ้าชานอ้อยเพียงร้อยละ 5 ส่งผลต่อกำลังอัดสูงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม พบว่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 75-90 85-95 และ105-140 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อายุ 28 วัน และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.60 0.55 และ0.50 ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 มีร้อยละกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 238 181 และ 160 ตามลำดับ โดยร้อยละของกำลังอัดจะลดลงตามอัตราส่วน AL/B ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน ของจีโอโพลิเมอร์ควบคุม จากรูปที่ 41 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดทุกอัตราส่วนผสมและทุกอายุการทดสอบ ถัดมาจะเป็นการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 และเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 ตามลำดับ



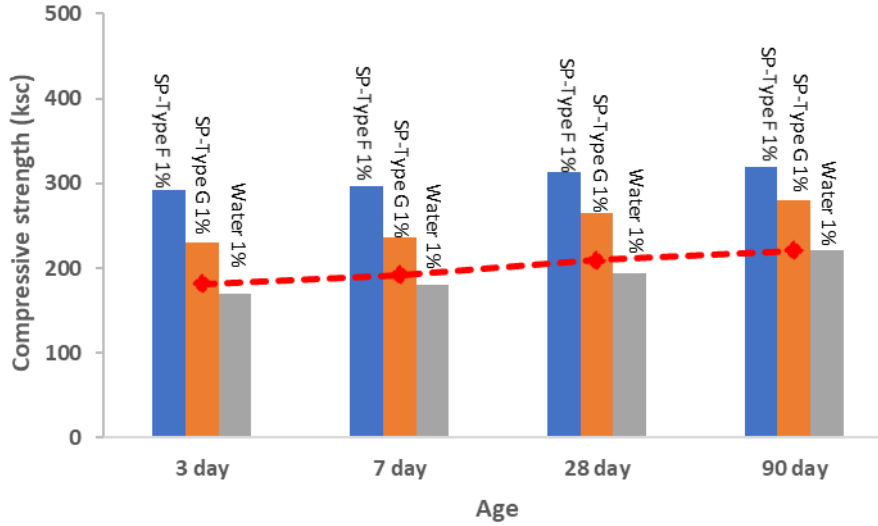
รูปที่ 41 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่วัสดุตั้งต้นแตกต่างกัน เทียบกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

4.5.5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่ทำการปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ โดยเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมสุดคือ AL/ B เท่ากับ 0.55 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์ ดำเนินการทดสอบโดยเพิ่มสารลดน้ำพิเศษชนิด F G และน้ำ ในอัตราส่วนร้อยละ 1 3 และ 5 บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทดสอบตัวอย่างที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน จากตารางที่ 28 พบว่าการเติมสารลดน้ำพิเศษชนิด F และ G นั้น ส่งผลต่อค่าการยุบตัว และมีผลต่อกำลังอัดที่มีแนวโน้มดีกว่าเมื่อเทียบกับการเติมน้ำในปริมาณที่เท่ากันทุกสัดสวนผสม (Alrefaei et al., 2020) เนื่องจากสารลดน้ำพิเศษเป็น Polycarboxylate-based ซึ่งได้จากเกลือโซเดียมและเกลือแคลเซียมซึ่งมีความเป็นด่างสูง เมื่อเติมในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อระบบจีโอโพลิเมอร์ ส่วนน้ำที่เติมเข้าไปนั้นจะเจือจางความเข้มข้นของสารละลายทำให้ความเป็นด่างลดลงและส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน จากรูปที่ 42 แสดงให้เห็นว่าการเติมสารผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักเถ้าชานอ้อย สารลดน้ำพิเศษชนิด F มีค่ากำลังอัดสูงสุดทุกช่วงอายุการทดสอบโดยที่อายุทดสอบ 28 วันเท่ากับ 313 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในส่วนความสามารถในการทำงานได้ทดสอบด้วยค่าการยุบตัวพบว่ามีค่าต่ำกว่าสารลดน้ำพิเศษชนิด G และน้ำ ตามลำดับ รูปที่ 43 แสดงให้เห็นว่าการเติมสารผสมเพิ่มและน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 3 ของน้ำหนักเถ้าชานอ้อย กลับพบว่าสารลดน้ำพิเศษชนิด G มีค่ากำลังอัดสูงสุดทุกช่วงอายุการทดสอบ และมีความสามารถในการทำงานได้สูงถึง 120 มิลิเมตร ที่อายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดของจีโอโพลอเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่เติมสารชนิด F

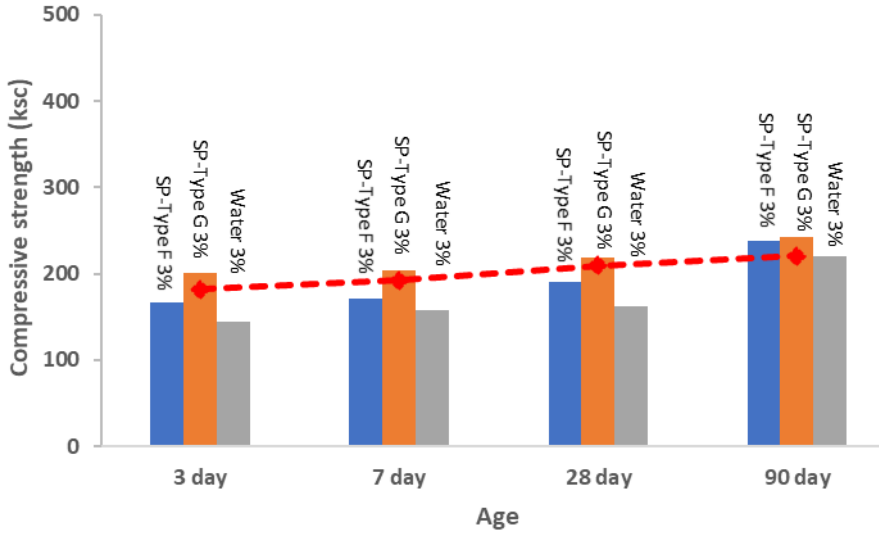
ตารางที่ 28 *ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่เพิ่มสารลดน้ำพิเศษและน้ำ*

Mixed Code name.	Slump mm.	Strength (ksc), *(%)*			
		3 day	7 day	28 day	90 day
BA-SP1F	20	292 *(93)*	297 *(95)*	313 *(100)*	319 *(102)*
BA-SP3F	75	180 *(95)*	171 *(90)*	190 *(100)*	239 *(126)*
BA-SP5F	140	114 *(74)*	121 *(79)*	154 *(100)*	169 *(110)*
BA-SP1G	75	230 *(87)*	236 *(89)*	265 *(100)*	280 *(106)*
BA-SP3G	120	203 *(93)*	200 *(92)*	218 *(100)*	242 *(111)*
BA-SP5G	145	132 *(80)*	138 *(83)*	166 *(100)*	192 *(117)*
BA-W1	27	169 *(87)*	181 *(93)*	194 *(100)*	221 *(114)*
BA-W3	30	145 *(90)*	157 *(97)*	162 *(100)*	220 *(136)*
BA-W5	33	108 *(79)*	123 *(90)*	137 *(100)*	151 *(110)*

และ G มีค่ากำลังอัดต่างกันไม่มากนัก ส่วนการเติมน้ำให้ค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัวน้อยกว่าการเติมสารลดน้ำพิเศษทั้ง 2 ชนิด และกำลังอัดต่ำกว่าทุกช่วงอายุการทดสอบ รูปที่ 44 แสดงให้เห็นว่าเมื่อ



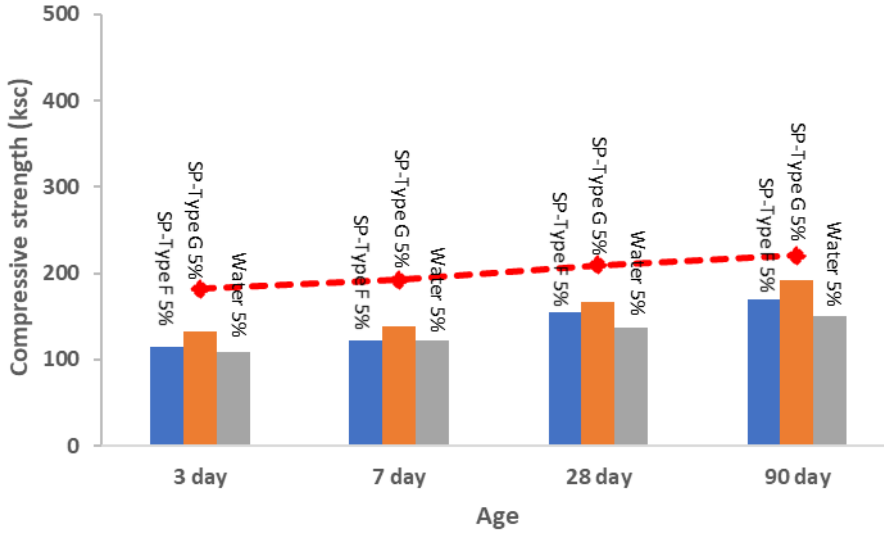
รูปที่ 42 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยใช้สารผสมเพิ่มต่างชนิดกันในอัตราส่วนร้อยละ 1 ของปริมาณเถ้าชานอ้อย*



รูปที่ 43 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยใช้สารผสมเพิ่มต่างชนิดกันในอัตราส่วนร้อยละ 3 ของปริมาณเถ้าชานอ้อย*

เติมสารผสมเพิ่มทั้ง 2 ชนิดและน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของเถ้าชานอ้อย พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด และค่าการยุบตัวที่สูงขึ้นมากกว่าการเติมน้ำอย่างเห็นได้ชัดเจน ในกรณีของน้ำที่เติมเข้าไปทุกอัตราส่วนผสมนั้นพบว่าไม่มีผลต่อการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

อย่างมีนัยสำคัญ การเติมสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนร้อยละ 3 นั้นเหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยเพื่อปรับปรุงสมบัติจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทั้งทางด้านความสามารถในการทำงานได้ และกำลังอัดให้มีแนวโน้มดีกว่าในกรณีที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ



รูปที่ 44 *กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยใช้สารผสมเพิ่มต่างชนิดกันในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของปริมาณเถ้าชานอ้อย*

4.6 การซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง เทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วน W/C เท่ากับ 0.55 บ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องทั่วไปทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน จากตารางที่ 29 พบว่าค่าการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตทั่วไปมีแนวโน้มลดลงตามระดับความลึกของคอนกรีต จากผลการทดสอบสังเกตุเห็นได้ว่าค่าการยุบตัวที่สูงของคอนกรีตทั่วไป ส่งผลทำให้มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำเนื่องจากผลของการอัดแน่นในแบบหล่อที่ดีกว่า ในส่วนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวที่ต่ำนั้นเนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีความหนืดของสารละลายที่สูงกว่า (Olivia & Nikraz, 2011) เมื่อทำการอัดแน่นในแบบหล่อทำให้มีความแน่นไม่สม่ำเสมอ และประกอบกับความร้อนในการบ่มนั้นทำให้น้ำระเหยออกอย่างรวดเร็วในตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์จึงทำให้เกิดโพรงภายในของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ และมีค่ากำลังอัดที่ต่ำทำให้มีการซึมผ่านน้ำสูงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Sanawong & Chalee, 2010) เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยสูงกว่าถึงร้อยละ 50 ของคอนกรีตทั่วไป

ตารางที่ 29 *ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำที่แรงดัน 1 บาร์ ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยคอนกรีต ที่อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 เทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่อัตราส่วน W/C เทากับ 0.55*

Mixed Code name.	AL/B, W/C Ratio	Slump (mm)	Strength (ksc)	K (m/s)			
			28 day	K_1	K_2	K_3	K_{avg}
BA-control	0.55	26	210	5.79E-10	9.73E-9	1.00E-8	6.77E-09
OPC-concrete	0.55	72	340	5.15E-12	9.15E-12	2.22E-11	1.22E-11

4.7 การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง เทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังอัดใกล้เคียงกัน บ่มน้ำที่อุณหภูมิทั่วไปทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน ทดสอบทั้งหมด 6 รอบ รวม 72 ชั่วโมง รูปที่ 45 แสดงให้เห็นว่าเมื่อคอนกรีตผ่านการทดสอบแล้วสังเกตุการสึกกร่อนด้วยสายตาพบว่าคอนกรีตทั่วไปมีร่องรอยของหลุมบนพื้นผิวมากกว่าจีโอโพลิเมอร์อย่างชัดเจน และจากตารางที่ 30 พบว่าค่าการสึกกร่อนของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปมีค่าการสึกกร่อนสูงถึง 1.3 เท่า เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยที่กำลังอัดใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความคงทนมากกว่าคอนกรีตทั่วไปซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Ramujee & Potharaju, 2014) และเมื่อพิจารณาผลของกำลังอัดพบว่ากำลังอัดที่สูงของคอนกรีตทั่วไปไม่มีผลต่อการสึกกร่อนที่ลดลง

รูปที่ 45 *การสึกกร่อนที่ปรากฏของคอนกรีตหลังการทดสอบ (a) คอนกรีตทั่วไป และ (b) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย*

ตารางที่ 30 *ผลการทดสอบการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยเทียบกับคอนกรีตทั่วไป*

Time (hr)	OPC Concrete	GPC BA
	ADA_t (mm)	ADA_t (mm)
0	0	0
12	0.30	0.20
24	0.80	0.60
36	1.00	0.90
48	1.40	1.20
60	1.80	1.50
72	2.10	1.60
Strength (ksc)	379	332

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเพื่อพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบ

1. การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่าการแทนที่ด้วยวัสดุอื่นในเถ้าชานอ้อยนั้นส่งผลกระทบโดยตรงกับระยะเวลาการก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ส่งผลให้เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุม

2. อัตราส่วน AL/B มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย โดยอัตราส่วน AL/B ที่ต่ำจะมีแนวโน้มทำให้กำลังอัดสูงขึ้น แต่ความสามารถในการทำงานได้จะค่อนข้างต่ำมาก โดยพบว่าอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสูงสุด อย่างไรก็ดี พบว่าอัตราส่วนของ AL/B ที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เท่ากับ 0.55 โดยเป็นผลเนื่องจากมีความสามารถในการทำงานได้

3. อัตราส่วน CA/AL มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย โดยอัตราส่วน CA/AL ที่สูงจะมีแนวโน้มทำให้กำลังอัดสูงขึ้น แต่ความสามารถในการทำงานได้จะค่อนข้างต่ำตามอัตราส่วน CA/AL ที่สูงขึ้น โดยพบว่า CA/AL เท่ากับ 6 ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสูงสุด อย่างไรก็ดี พบว่าอัตราส่วนของ CA/AL ที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เท่ากับ 5.5 โดยเป็นผลเนื่องจากมีความสามารถในการทำงานได้ และยังพบอีกว่าหินปูนย่อยนั้นมีความเหมาะสมเหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ทั้งความสามารถในการทำงานได้ และกำลังอัด

4. สารผสมลดน้ำพิเศษ ประเภท F และ G ชนิดที่มีส่วนประกอบของ Polycarboxylate-based ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ถึง 3 มีความเหมาะสมในการเติมเพื่อเพิ่มกำลังอัดและค่าการยุบตัว การเติมน้ำไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทั้งด้านกำลังอัดและการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อย

5. จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ไม่มีการแทนที่วัสดุอื่นหรือจีโอโพลิเมอร์ควบคุมมีการหดตัวที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมและตะกอนน้ำประปาเผา ตามลำดับ แต่สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการแตกร้าวของตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถวัดค่าการหดตัวได้

6. กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย แทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผาในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 มีความเหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่สุดเมื่อพิจารณาในกลุ่มของวัสดุ

เหลือทิ้ง แต่สำหรับจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ให้กำลังอัดที่สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุมและจีโอโพลิเมอร์ที่แทนที่ด้วยวัสดุเหลือทิ้งอย่างชัดเจน

7. อุณหภูมิการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 80 ถึง100 องศาเซลเซียส จะให้กำลังอัดสูงในช่วง 3 วันแรก และลดลงในช่วงอายุ 7 วัน หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึง 90 วัน สำหรับการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีอัตราการพัฒนากำลังอัดที่ช้า แต่เพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่มตัวอย่าง ส่วนอุณหภูมิการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการบ่มมากสุดเมื่อพิจารณาถึงแนวโน้การพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้นตามอายุตัวอย่างซึ่งมีความสอดคล้องกับคอนกรีตทั่วไป

8. จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยมีความทึบน้ำต่ำกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ทั่วไป และจะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านน้ำจะลดลงตามระยะความลึกของตัวอย่าง

9. ความต้านทานต่อการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ทั่วไปถึง 1.3 เท่า

10. เถ้าชานอ้อยสามารถนำมาผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แต่ต้องเพิ่มความละเอียดโดยการบดให้มีอนุภาคที่เล็กลง และควรผสมวัสดุอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น การผสมตะกอนน้ำประปาเผา นั้นเหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในเทอมของด้านกำลังและความสามารถในการทำงานได้ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีความเหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยด้านกำลังอัด และเศษอะลูมิเนียมนั้นไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของเถ้าชานอ้อยไม่มากนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งต่อไปควรเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น หรือแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินเพื่อให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ในสภาพแวดล้อมทั่วไป ปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ด้วยการเติมน้ำ และลดการหดตัวเมื่อแห้งด้วยการป้องกันน้ำไม่ให้ระเหยออกอย่างรวดเร็วจากตัวอย่าง โดยการแรปด้วยพลาสติกหลังจากนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่ในแบบหล่อ

สำหรับการศึกษาครั้งต่อไปควรเพิ่มการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับตะกอนน้ำประปาเผาหรือเถ้าถ่านหิน เพื่อปรับปรุงทั้งความสามารถด้านกำลังอัด และความคงทนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

บรรณานุกรม

บรรณานุกรรม

เกียรติสุดา สมนา. (2559). การใช้ตะกอนประปาเป็นวัสดุประสาน. *วารสารคอนกรีต*, *28*.

คาวี มนทการติวงศ์. (2458). *ผลกระทบของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่มีต่อกำลังอัดและความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อย*. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2453). *การพัฒนาเพื่อนำเถ้าหินบดจากแม่เหมาะไปใช้ในงานคอนกรีต*. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ. (2556). *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต*. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2556.

มนตรี คงสุข และคณะ. (2559). Journal of Thailand Concrete Association วารสาร วิชาการ สมาคม คอนกรีต แห่ง ประเทศไทย. *Thaitca.or.Th*, *4*(1), 30–39.

วิเชียร ชาลี. (2559). *ผล ของ ความ ละเอียด ของ เถ้า แกลบ และ ความ เข้มข้น ของ โซเดียม ไฮ ด รอก ไซ ด์ ต่อ กำลัง อัด ของ จี โอ พอ ลิเมอร์คอนกรีต*.

ACI 226.3R-87. (1987). Use of fly ash in concrete. ACI 226.3 R-87. *ACI Journal Proceedings*, *84*(5), 381–409.

Alrefaei, Y., Wang, Y. S., Dai, J. G., & Xu, Q. F. (2020). Effect of superplasticizers on properties of one-part Ca(OH)2/Na2SO4 activated geopolymer pastes. *Construction and Building Materials*, *241*, 117990. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117990

Arif, E., Clark, M. W., & Lake, N. (2017). Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. *Construction and Building Materials*, *151*, 692–703. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.136

ASTM B120. (2002). *Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Drawn Seamless Tubes for Condensers and Heat Exchangers [Metric] 1* (Vol. 03). https://doi.org/10.1520/B0234-10.2

ASTM C1138. (1997). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method). In *American Society for Testing and Materials*.

https://doi.org/10.1520/C1138M-05R10e1.2

ASTM C143. (2010). Designation: C 143/C 143M – 03 Standard. *ASTM International*, *26*(10), 7512–7515. https://doi.org/10.1021/la904316f

ASTM C157/C157M. (2004). *Standard specification for chemical admixtures for concrete*. American Society for Testing and Materials Philadelphia.

ASTM C157/C157M. (2014). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. In *ASTM International*.

ASTM C168. (2003). *ASTM C 618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use mineral admixture in Portland cement concrete*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C191-19. (2019). Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. *ASTM International*, *04*(May), 1–8. https://doi.org/10.1520/C0191-19

ASTM C596. (2000). *Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement* (Vol. 2, Issue 4).

Benavent, V., Steins, P., Sobrados, I., Sanz, J., Lambertin, D., Frizon, F., Rossignol, S., & Poulesquen, A. (2016). Impact of aluminum on the structure of geopolymers from the early stages to consolidated material. *Cement and Concrete Research*, *90*, 27–35. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.009

Chindaprasirt, P., & Rattanasak, U. (2017). Synthesis of polypropylene fiber/high-calcium fly ash geopolymer with outdoor heat exposure. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *19*(7), 1985–1992.

Concrete, I. (n.d.). Farmington Hills, Michigan, ACI Committee 232 (2004). *Use of Fly Ash USA, American Concrete Institute*, *41*.

Davidovits, J. (2008). Geopolymer Chemistry and Applications. 2nd. *Institute Geopolymere, France*.

Davidovits, J. (2015). False Values on CO2 Emission For Geopolymer

Cement/Concrete published In Scientific Papers. *Geopolymer Institute Library, Technical Paper*, *24*, 1–9.

Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. *Geopolymer*, *99*(292), 9–39.

Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, *125*, 594–600. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.066

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

Fan, F., Liu, Z., Xu, G., Peng, H., & Cai, C. S. (2018). Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, *160*, 66–81.

Geraldo, R. H., Fernandes, L. F. R., & Camarini, G. (2017). Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. *Journal of Cleaner Production*, *149*, 146–155. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076

Gluth, G. J. G., Lehmann, C., Rübner, K., & Kühne, H. C. (2013). Geopolymerization of a silica residue from waste treatment of chlorosilane production. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *46*(8), 1291–1298. https://doi.org/10.1617/s11527-012-9972-5

Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2016). Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, *124*, 352–362. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.121

Imran, M., & Anwar Khan, A. R. (2018). Characterization of Agricultural Waste Sugarcane Bagasse Ash at 1100°C with various hours. *Materials Today: Proceedings*, *5*(2), 3346–3352. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.577

Khan, I., Xu, T., Castel, A., Gilbert, R. I., & Babaee, M. (2019). Risk of early age cracking in geopolymer concrete due to restrained shrinkage. *Construction and Building*

Materials, *229*, 116840. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116840

Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, *40*(2), 334–339. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017

Lau, C. K., Lee, H., Vimonsatit, V., Huen, W. Y., & Chindaprasirt, P. (2019). Abrasion resistance behaviour of fly ash based geopolymer using nanoindentation and artificial neural network. *Construction and Building Materials*, *212*, 635–644.

Lea, F. M. (1970). The Chemistry of Cement and Concrete, Ed. *Arnold, London*, 243.

Lee, N. K., Jang, J. G., & Lee, H. K. (2014). Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. *Cement and Concrete Composites*, *53*, 239–248. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.007

Mahasenan, N., Smith, S., & Humphreys, K. (2003). The cement industry and global climate change: current and potential future cement industry CO2 emissions. *Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference*, 995–1000.

Malhotra, V. M. (2002). High-performance high-volume fly ash concrete. *Concrete International*, *24*(7), 30–34.

Malhotra, V. M., & Ramezanianpour, A. R. (1994). Fly ash in concrete, CANMET. *Energy, Mines and Resources Canada*, 307.

McCoy, T. J., Ketcham, R. A., Wilson, L., Benedix, G. K., Wadhwa, M., & Davis, A. M. (2006). Formation of vesicles in asteroidal basaltic meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, *246*(1–2), 102–108.

Mehta, A., & Siddique, R. (2017a). Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash. *Construction and Building Materials*, *150*, 792–807.

Mehta, A., & Siddique, R. (2017b). Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, *141*, 325–334.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.031

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (1981). Concrete Prentice-Hall. *Englewood Cliffs, NJ*, *481*.

Mishra, A., Choudhary, D., Jain, N., Kumar, M., Sharda, N., & Dutt, D. (2008). Effect of concentration of alkaline liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *3*(1), 14–18.

Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, *66*, 163–171.

Nematollahi, B., & Sanjayan, J. (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Materials and Design*, *57*, 667–672. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.064

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology*. Longman Scientific & Technical England.

Nimwinya, E., Arjharn, W., Horpibulsuk, S., Phoo-Ngernkham, T., & Poowancum, A. (2016). A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, *119*, 128–134.

No, P., & Varner, R. L. (2013). *Influences of Cement Source and Sample of Cement Source on Compressive Strength Variability of Gravel Aggregate Concrete Prepared by*. *106002*.

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

Novais, R. M., Ascensão, G., Ferreira, N., Seabra, M. P., & Labrincha, J. A. (2018). Influence of water and aluminium powder content on the properties of waste-containing geopolymer foams. *Ceramics International*, *44*(6), 6242–6249.

https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.009

Nuruddin, M. F., Demie, S., Ahmed, M. F., & Shafiq, N. (2011). Effect of superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and microstructure properties of self-compacting geopolymer concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *51*(3), 907–914. https://doi.org/10.5281/zenodo.1062742

Olivia, M., & Nikraz, H. R. (2011). Strength and water penetrability of fly ash geopolymer concrete. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, *6*(7), 70–78.

Onutai, S., Jiemsirilers, S., Thavorniti, P., & Kobayashi, T. (2015). Aluminium hydroxide waste based geopolymer composed of fly ash for sustainable cement materials. *Construction and Building Materials*, *101*, 298–308. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.097

Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials and Design*, *53*, 269–274. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.018

Parveen, Singhal, D., Junaid, M. T., Jindal, B. B., & Mehta, A. (2018). Mechanical and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete incorporating alccofine at ambient curing. *Construction and Building Materials*, *180*(2018), 298–307. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.286

Patankar, S. V, Jamkar, S. S., & Ghugal, Y. M. (2013). Effect of Water-To-Geopolymer Binder Ratio on the Production of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering*, *1*, 79–83. https://doi.org/10.13140/2.1.4792.1284

Pérez-Villarejo, L., Bonet-Martínez, E., Eliche-Quesada, D., Sánchez-Soto, P. J., Rincón-López, J. M., & Castro-Galiano, E. (2018). Biomass fly ash and aluminium industry slags-based geopolymers. *Materials Letters*, *229*, 6–12. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.100

Perná, I., & Hanzlíček, T. (2014). The solidification of aluminum production waste in geopolymer matrix. *Journal of Cleaner Production*, *84*(1), 657–662. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.043

Pilehvar, S., Arnhof, M., Pamies, R., Valentini, L., & Kjøniksen, A. L. (2020). Utilization of urea as an accessible superplasticizer on the moon for lunar geopolymer mixtures. *Journal of Cleaner Production*, *247*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119177

Punurai, W., Kroehong, W., Saptamongkol, A., & Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, *186*, 62–70. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115

Ramujee, K., & Potharaju, M. (2014). Abrasion Resistance of Geopolymer Composites. *Procedia Materials Science*, *6*(Icmpc), 1961–1966. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.230

Roviello, G., Menna, C., Tarallo, O., Ricciotti, L., Messina, F., Ferone, C., Asprone, D., & Cioffi, R. (2017). Lightweight geopolymer-based hybrid materials. *Composites Part B: Engineering*, *128*, 225–237. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.020

Salami, B. A., Megat Johari, M. A., Ahmad, Z. A., & Maslehuddin, M. (2016). Impact of added water and superplasticizer on early compressive strength of selected mixtures of palm oil fuel ash-based engineered geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, *109*, 198–206. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.033

Sanawong, C., & Chalee, W. (2010). *Water Permeability in Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. *4*(3), 2–6.

Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, *34*(1), 94–100.

https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.003

Shehab, H. K., Eisa, A. S., & Wahba, A. M. (2016). Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, *126*, 560–565. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.059

Singh, B., Rahman, M. R., Paswan, R., & Bhattacharyya, S. K. (2016). Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, *118*, 171–179. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.008

Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2010). Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, *24*(3), 236–240.

Souza, A. E., Teixeira, S. R., Santos, G. T. A., Costa, F. B., & Longo, E. (2011). Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, *92*(10), 2774–2780. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.020

Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Boongrasan, S., Udomchai, A., Chinkulkijniwat, A., & Arulrajah, A. (2015). Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge–fly ash lightweight cellular geopolymer. *Construction and Building Materials*, *94*, 807–816.

Swanepoel, J. C., & Strydom, C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, *17*(8), 1143–1148.

Tchakouté, H. K., Rüscher, C. H., Hinsch, M., Djobo, J. N. Y., Kamseu, E., & Leonelli, C. (2017). Utilization of sodium waterglass from sugar cane bagasse ash as a new alternative hardener for producing metakaolin-based geopolymer cement. *Chemie Der Erde*, *77*(2), 257–266. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.04.003

Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and*

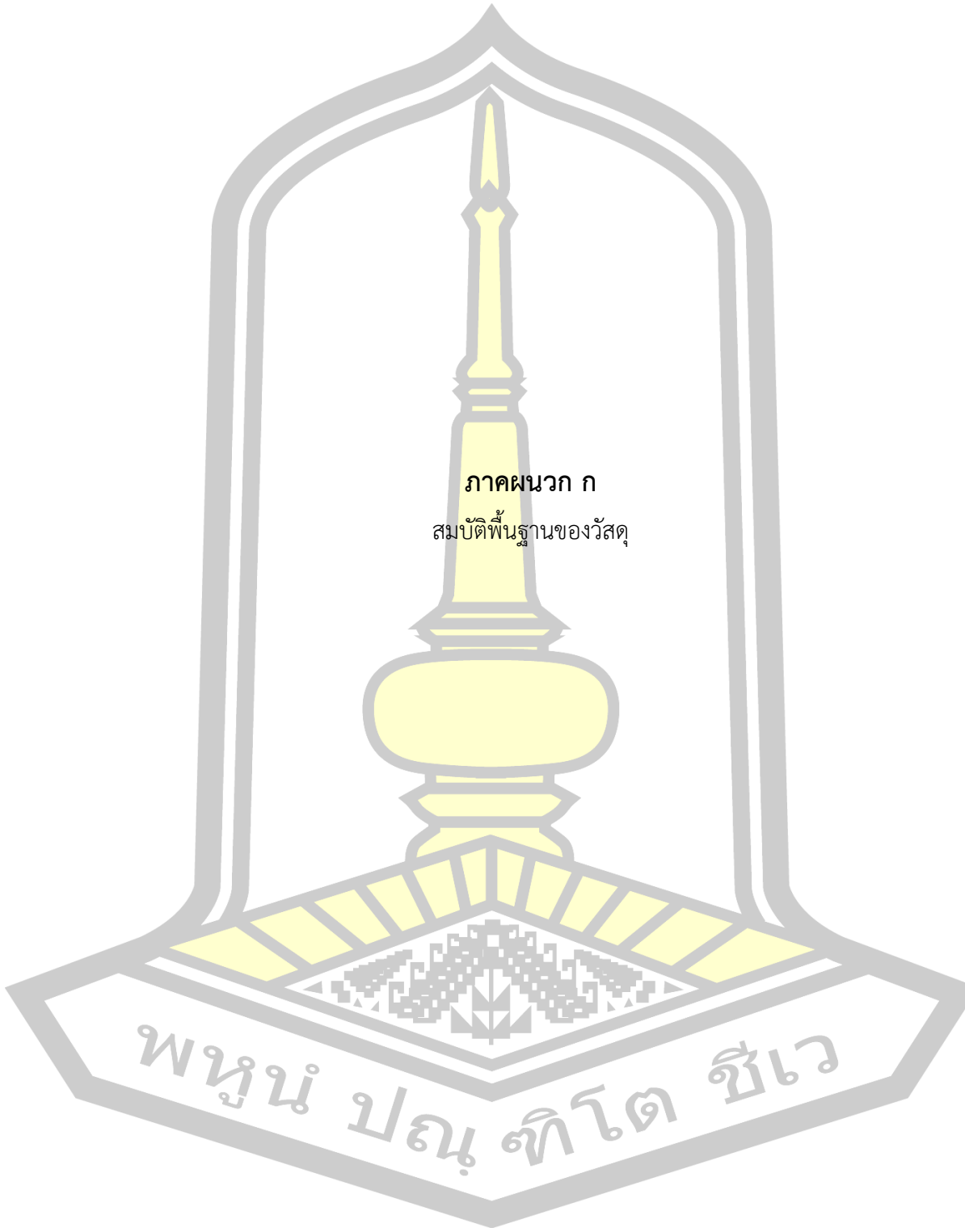
Building Materials, *43*, 125–130. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023

Waijarean, N., Asavapisit, S., & Sombatsompop, K. (2014). Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals. *Construction and Building Materials*, *50*, 486–491. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.047

Yang, T., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, X., Zhang, C., & Wu, Q. (2018). Effect of fly ash microsphere on the rheology and microstructure of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Cement and Concrete Research*, *109*(January), 198–207. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.008

Yaseri, S., Hajiaghaei, G., Mohammadi, F., Mahdikhani, M., & Farokhzad, R. (2017). The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, *157*, 534–545. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.102

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ตารางที่ ก.1 *ความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยก่อนและหลังบด*

Description	BA (before grinding)	BA (after grinding)
Weight of samples, W (g)	50.00	50.00
Initial quantity (cm^3)	2.00	2.00
Final quantity (cm^3)	26.00	20.90
quantity that is replaced by the samples, V (cm^3)	28.00	22.90
Water density, ρ (kg/ cm^3)	1.00	1.00
Specific gravity, SG=W/V ρ	**1.79**	**2.18**

ตารางที่ ก.2 *ความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมของทรายแม่น้ำแหล่งน้ำพอง*

Description	Samples No.1	Samples No.2
Weight of Glass graduate, G (g)	159.51	159.51
Weight of Glass graduate, G (g) + Water, B (g)	655.44	655.4
Weight of Saturates Surface- Dry Sand, S (g)	500	500
Weight of Water+Sand+Glass Gruate, C (g)	963.76	962.46
Weight of Oven-Dry Sand, A (g)	496.19	495.26
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) A/B+S-C	2.59	2.57
Bulk Specific Gravity (SSD) S/B+S-C	2.61	2.59
Apparent Specific Gravity	2.64	2.63
Absorption (%)	0.77%	0.96%
Average Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.58	
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	2.60	
Average Apparent Specific Gravity	2.64	
Average Absorption (%)	**0.86%**	

ตารางที่ ก.3 *ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทราย*

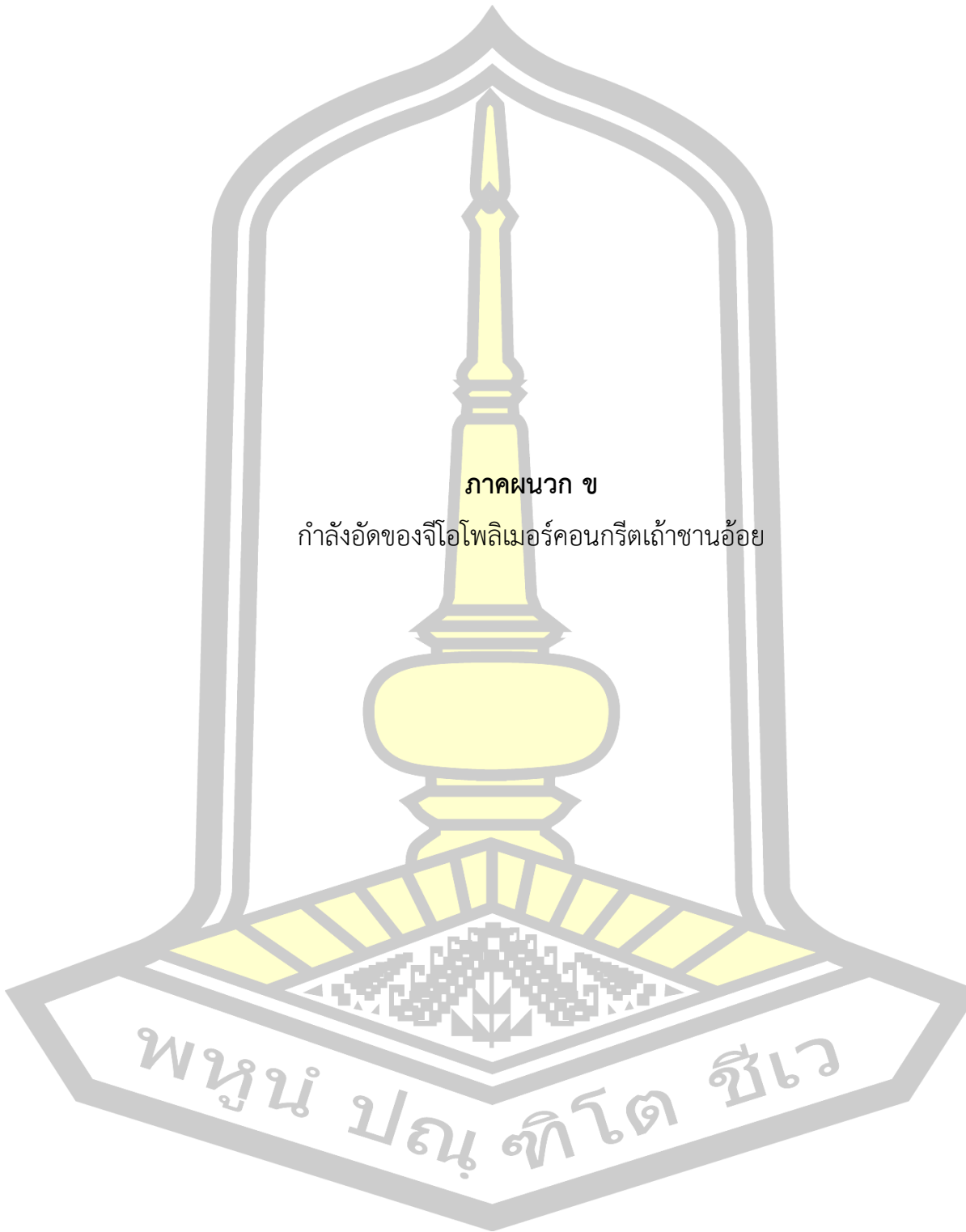
Sieve No.	WT.Sieve	WT.Sieve+ Sample	WT.Sample Retained	Percent Retained	Acumulative %Retained	%Passing
3/8"	0	0	0	0	0	100.00
4#	538.33	553.00	14.67	2.93	2.93	97.07
8#	449.33	514.33	65.00	13.00	15.93	84.07
16#	458.00	534.00	76.00	15.20	31.13	68.87
30#	402.00	495.67	93.67	18.73	49.87	50.13
50#	368.00	481.33	113.33	22.67	72.53	27.47
100#	351.67	468.00	116.33	23.27	95.80	4.20
Total Sample=			487.33	**FM=** (268.20/100) = **2.68**		

ตารางที่ ก.4 *ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมหยาบต่างชนิดกัน ขนาด 3/8”*

Description	Type-A	Type-B	Type-C
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.66	2.69	2.32
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.68	2.75	2.42
Apparent specific gravity	**2.70**	**2.86**	**2.63**
Absorption (%)	**0.50**	**2.15**	**1.73**

ตารางที่ ก.5 *การสึกกร่อนของของมวลรวมหยาบต่างชนิดกัน ขนาด 3/8”*

Sieve Size (Square Openings)		Mass of Indicated Sizes, g		
Passing	Retained on	Type-A	Type-B	Type-C
9.5 mm (3/8 in.)	6.3 mm (1/4 in.)	5,000	5,000	5,000
6.3 mm (1/4 in.)	4.75-mm (No. 4)	-	-	-
4.75-mm (No. 4)	2.36-mm (No. 8)	-	-	-
Total (A)		5,000	5,000	5,000
(B)	1.70-mm (No. 12)	3,675	4,015	3564
1.70-mm (No. 12)	(C)	1,325	985	1436
% Loss (A-B)/A		**26.50**	**19.70**	**28.72**



ภาคผนวก ข

กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

ตารางที่ ข.1 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยควบคุม บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
Control 0.60	3	86.39	124.13	139.19	116.57
	7	130.88	131.05	129.72	130.55
	28	157.48	154.67	147.16	153.10
	90	211.25	219.14	218.66	216.35
Control 0.55	3	185.09	169.30	190.51	181.65
	7	190.51	196.91	189.30	192.24
	28	203.85	214.21	210.51	209.53
	90	211.74	223.22	227.78	220.91
Control 0.50	3	173.49	204.34	218.16	198.66
	7	222.09	233.08	223.89	226.35
	28	243.14	230.03	244.00	239.06
	90	265.98	270.77	284.30	273.68

ตารางที่ ข.2 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผา บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
A0.6WWS7.5-60	3	164.60	178.43	169.30	170.78
	7	175.22	184.11	176.47	178.60
	28	193.23	190.51	188.05	190.60
	90	213.35	213.22	213.47	213.35
A0.55WWS7.5-60	3	223.10	231.21	227.19	227.17
	7	229.76	232.84	235.92	232.84
	28	270.73	266.53	251.97	263.08
	90	299.60	294.42	297.01	297.01
A0.50WWS7.5-60	3	263.81	259.37	254.93	259.37
	7	277.14	269.73	273.43	273.43
	28	268.15	328.47	302.80	299.81
	90	380.30	423.49	347.73	383.84

ตารางที่ ข.2 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผา บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
A0.6WWS7.5-60	3	164.60	178.43	169.30	170.78
	7	175.22	184.11	176.47	178.60
	28	193.23	190.51	188.05	190.60
	90	213.35	213.22	213.47	213.35
A0.55WWS7.5-60	3	223.10	231.21	227.19	227.17
	7	229.76	232.84	235.92	232.84
	28	270.73	266.53	251.97	263.08
	90	299.60	294.42	297.01	297.01
A0.6WWS5.0-60	3	182.87	172.65	162.38	172.63
	7	181.89	182.37	195.45	186.57
	28	213.23	212.98	213.47	213.23
	90	257.89	251.48	252.96	254.11
A0.55WWS5.5-60	3	212.98	229.99	201.87	214.95
	7	231.97	226.80	237.16	231.98
	28	239.88	253.45	246.64	246.66
	90	285.29	295.90	283.07	288.09
A0.50WWS5.5-60	3	283.56	273.19	291.21	282.65
	7	300.34	295.28	293.43	296.35
	28	321.56	314.40	314.40	316.79
	90	372.12	370.17	368.20	370.16
B0.7WWS7.5-60	3	52.57	51.09	50.09	51.25
	7	59.23	63.92	59.97	61.04
	28	66.14	63.67	64.16	64.66
	90	92.54	96.25	98.22	95.67
B0.65WWS7.5-60	3	75.28	82.18	72.56	76.67
	7	85.88	89.09	93.28	89.42
	28	98.47	98.96	95.75	97.73
	90	143.14	134.25	146.60	141.33

ตารางที่ ข.2 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผา บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
B0.65WWS7.5-60	3	75.28	82.18	72.56	76.67
	7	85.88	89.09	93.28	89.42
	28	98.47	98.96	95.75	97.73
	90	143.14	134.25	146.60	141.33
B0.60WWS7.5-60	3	90.57	85.38	108.35	94.77
	7	111.55	120.67	108.35	113.52
	28	135.24	118.95	122.89	125.69
	90	182.37	164.36	186.57	177.77
B0.7WWS5.0-60	3	54.29	58.00	50.59	54.29
	7	57.01	59.97	54.79	57.26
	28	95.26	90.82	94.77	93.62
	90	130.55	135.98	139.47	135.33
B0.65WWS5.0-60	3	76.02	66.88	76.26	73.05
	7	87.12	80.20	88.10	85.14
	28	102.67	91.56	108.09	100.77
	90	194.47	130.05	144.86	156.46
B0.60WWS5.0-60	3	111.56	109.09	110.31	110.32
	7	126.85	120.93	86.62	111.47
	28	139.19	139.68	138.20	139.02
	90	186.33	192.08	189.77	189.39

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ตารางที่ ข.3 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
0.60WWS7.5-40	3	133.76	151.88	140.67	142.10
	7	148.97	128.82	161.98	146.59
	28	169.61	172.84	168.01	170.15
	90	234.94	234.94	235.92	235.27
0.55WWS7.5-40	3	171.50	167.35	159.73	166.19
	7	177.69	170.53	174.11	174.11
	28	195.12	193.79	192.25	193.72
	90	275.02	252.84	252.84	260.23
0.50WWS7.5-40	3	167.54	175.34	168.60	170.49
	7	175.33	173.00	177.65	175.33
	28	251.23	217.42	218.90	229.18
	90	292.86	302.36	305.57	300.26
0.60WWS7.5-60	3	185.59	194.99	185.09	188.56
	7	194.05	181.76	197.51	191.10
	28	222.85	221.86	201.37	215.36
	90	236.18	249.01	245.87	243.68
0.55WWS7.5-60	3	227.54	233.70	256.41	239.22
	7	248.76	248.69	261.49	252.98
	28	272.40	258.88	274.92	268.73
	90	309.13	316.62	319.93	315.23
0.50WWS7.5-60	3	272.95	266.03	279.36	272.78
	7	281.58	279.94	308.72	290.08
	28	298.85	310.97	309.18	306.33
	90	355.13	361.30	346.45	354.29
0.60WWS7.5-80	3	245.27	248.38	256.61	250.09
	7	231.90	233.12	230.69	231.90
	28	240.62	241.36	250.98	244.32
	90	252.87	252.71	248.18	251.25

ตารางที่ ข.3 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม (ต่อ)

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
0.55WWS7.5-80	3	270.95	272.52	272.34	271.93
	7	259.87	268.74	277.63	268.75
	28	274.92	294.91	260.11	276.65
	90	299.22	293.20	304.54	298.99
0.50WWS7.5-80	3	282.24	280.94	281.59	281.59
	7	273.13	259.29	256.74	263.05
	28	287.75	269.99	273.43	277.06
	90	324.83	307.96	321.63	318.14
0.60WWS7.5-100	3	409.90	419.30	399.80	409.67
	7	359.16	364.54	362.11	361.94
	28	366.97	360.18	377.84	368.33
	90	382.01	382.02	397.59	387.21
0.55WWS7.5-100	3	422.01	405.72	413.87	413.87
	7	388.44	397.82	373.13	386.46
	28	388.33	389.08	396.16	391.19
	90	405.11	401.18	409.11	405.13
0.50WWS7.5-100	3	414.15	433.32	423.73	423.73
	7	384.17	383.26	383.71	383.71
	28	440.25	438.29	436.34	438.29
	90	490.23	505.59	486.41	494.08

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ตารางที่ ข.4 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.4 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม และมวลรวมหยาบ

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
A0.60ALU0.4-40	3	82.68	68.60	84.16	78.48
	7	95.01	91.27	96.49	94.25
	28	163.86	160.16	174.97	166.33
	90	218.66	226.57	210.76	218.66
A0.55ALU0.4-40	3	90.08	101.67	82.92	91.56
	7	123.64	123.15	126.11	124.30
	28	199.41	189.53	171.76	186.90
	90	234.70	230.74	226.80	230.75
A0.50ALU0.4-40	3	89.83	97.73	90.72	93.78
	7	127.59	125.12	126.35	126.35
	28	244.56	211.99	215.44	224.00
	90	290.29	289.16	290.45	289.97
A0.60ALU0.4-60	3	151.78	151.54	143.88	149.06
	7	157.99	153.50	144.62	152.04
	28	174.97	176.21	184.11	178.43
	90	253.72	251.71	255.17	253.53
A0.55ALU0.4-60	3	185.83	195.45	188.79	190.02
	7	188.29	189.03	209.03	195.45
	28	217.42	213.72	207.55	212.90
	90	274.90	272.64	254.14	267.23
A0.50ALU0.4-60	3	221.86	212.73	204.09	212.90
	7	237.00	239.54	239.15	238.56
	28	262.22	245.62	253.31	253.72
	90	318.87	339.27	343.15	333.76
A0.60ALU0.4-80	3	213.78	209.62	213.32	212.24
	7	210.24	209.87	211.06	210.39
	28	225.32	215.94	219.40	220.22
	90	269.25	251.23	240.12	253.53

ตารางที่ ข.4 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยเศษอลูมิเนียมร้อยละ 0.4 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม และมวลรวมหยาบ (ต่อ)

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
A0.55ALU0.4-80	3	268.58	268.51	268.43	268.51
	7	254.19	242.59	256.91	251.23
	28	257.15	260.61	266.29	261.35
	90	277.88	282.19	279.87	279.98
A0.50ALU0.4-80	3	357.10	357.84	413.87	376.27
	7	334.33	345.38	323.49	334.40
	28	347.23	366.43	384.68	366.11
	90	380.11	385.40	382.76	382.76
C0.60ALU0.4-60	3	125.46	127.65	120.61	124.57
	7	138.18	132.45	140.67	137.10
	28	172.12	191.05	174.15	179.11
	90	235.83	201.76	242.53	226.71
C0.55ALU0.4-60	3	140.56	145.33	139.95	141.95
	7	155.21	138.81	142.51	145.51
	28	179.89	176.56	185.89	180.78
	90	235.95	236.93	245.87	239.58
C0.50ALU0.4-60	3	145.65	166.82	149.26	153.91
	7	161.53	164.65	154.84	159.34
	28	182.61	183.83	180.91	182.45
	90	235.67	275.26	246.42	252.45

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ตารางที่ ข.5 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
0.60OPC5-40	3	271.47	268.99	269.49	269.98
	7	288.74	291.95	285.04	288.58
	28	378.32	381.04	374.38	377.91
	90	369.81	356.11	349.21	358.38
0.55OPC5-40	3	270.23	293.68	279.61	281.17
	7	308.98	281.09	306.78	298.95
	28	379.80	402.89	425.95	402.88
	90	410.55	398.07	422.99	410.53
0.50OPC5-40	3	288.74	316.62	284.79	296.72
	7	316.92	305.37	325.74	316.01
	28	489.38	366.72	416.57	424.23
	90	488.64	505.17	501.71	498.51
0.60OPC5-60	3	284.79	288.23	281.83	284.95
	7	342.46	321.40	331.93	331.93
	28	364.01	368.46	358.09	363.52
	90	372.90	396.34	372.08	380.44
0.55OPC5-60	3	364.79	346.95	355.87	355.87
	7	375.36	374.12	328.47	359.32
	28	379.00	388.37	368.70	378.69
	90	400.91	394.96	400.54	398.81
0.50OPC5-60	3	352.03	361.72	367.19	360.31
	7	377.39	355.69	349.31	360.80
	28	380.82	385.21	383.02	383.02
	90	422.61	412.51	400.54	411.89
0.60OPC5-80	3	262.98	372.93	303.80	313.24
	7	310.22	303.54	306.63	306.80
	28	314.70	315.64	313.74	314.69
	90	333.54	352.73	350.75	345.67

ตารางที่ ข.5 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 แปรผันอุณหภูมิการบ่ม (ต่อ)

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
0.55OPC5-80	3	374.72	411.26	419.21	401.73
	7	401.74	395.35	398.64	398.58
	28	398.51	403.25	407.98	403.25
	90	413.13	420.27	427.43	420.28
0.50OPC5-80	3	414.85	426.81	411.43	417.69
	7	403.97	406.55	409.11	406.54
	28	419.29	416.28	422.31	419.29
	90	433.92	440.76	447.61	440.76

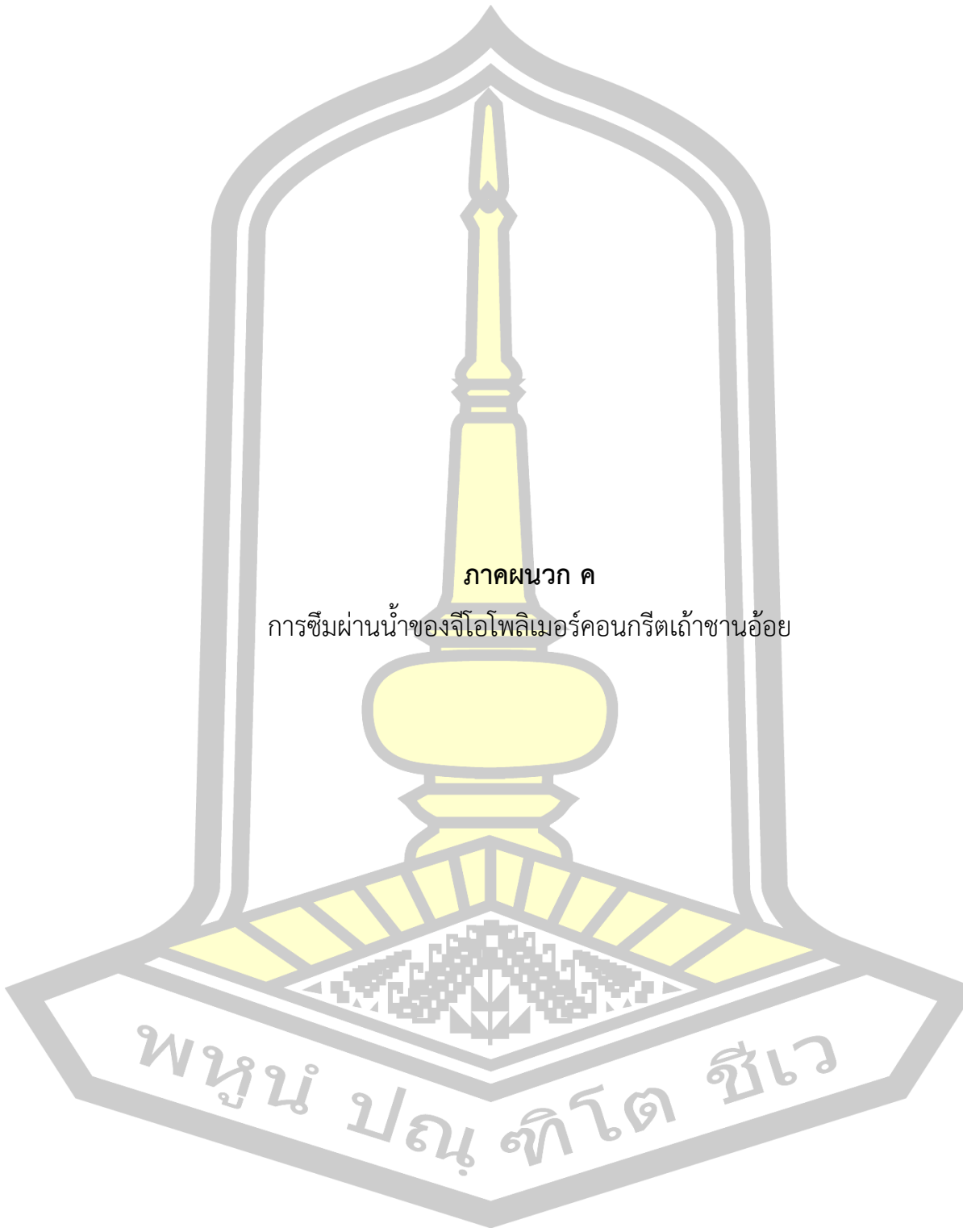
ตารางที่ ข.6 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่เพิ่มสารลดน้ำพิเศษและน้ำ

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
BA-SP1F	3	275.91	298.62	301.82	292.12
	7	296.40	305.02	290.47	297.30
	28	314.90	320.58	303.06	312.85
	90	330.94	303.30	322.55	318.93
BA-SP3F	3	190.27	181.39	167.08	179.58
	7	182.87	169.30	161.40	171.19
	28	184.11	184.11	202.37	190.19
	90	240.62	234.20	240.62	238.48
BA-SP5F	3	118.70	119.19	104.64	114.18
	7	119.96	119.45	124.38	121.26
	28	157.44	155.48	149.06	153.99
	90	177.44	159.18	171.02	169.22
BA-SP1G	3	231.01	218.16	241.36	230.18
	7	239.14	232.22	236.66	236.01
	28	270.73	245.55	278.62	264.96
	90	250.24	296.64	293.17	280.02

ตารางที่ ข.6 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย ที่เพิ่มสารลดน้ำพิเศษและน้ำ (ต่อ)

Mixed	Ages	Compressive Strength (ksc)			Average
	(days)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	(ksc)
BA-SP3G	3	200.89	208.29	201.13	203.44
	7	197.19	204.09	197.93	199.74
	28	194.23	230.26	229.52	218.00
	90	247.03	236.42	243.08	242.18
BA-SP5G	3	133.76	137.20	124.13	131.70
	7	106.16	112.73	106.35	138.37
	28	160.41	168.56	169.05	166.00
	90	181.89	196.45	198.17	192.17
BA-W1	3	164.92	170.03	173.36	169.44
	7	188.65	183.67	169.53	180.62
	28	190.64	188.78	201.45	193.62
	90	214.58	221.06	225.73	220.46
BA-W3	3	163.12	154.48	117.47	145.03
	7	151.78	146.34	173.99	157.37
	28	150.04	176.45	158.92	161.81
	90	224.82	224.82	209.03	219.56
BA-W5	3	114.18	109.93	101.10	108.40
	7	128.29	120.36	118.84	122.50
	28	141.40	132.90	135.49	136.60
	90	151.23	149.21	151.65	150.70

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว



ภาคผนวก ค

การซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

ตารางที่ ค.1 การซึมผ่านน้ำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยควบคุม AL/B เท่ากับ 0.55 บ่ม อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทดสอบที่อายุ 28 วัน

No.	Sample 1			Sample 2			Sample 3		
	L=45.9cm, d=10.00			L=45.9cm, d=10.01			L=45.5cm, d=10.00		
	Δt (sec)	Δh (cm)	Q (m^3/sec)	Δt (sec)	Δh (cm)	Q (m^3/sec)	Δt (sec)	Δh (cm)	Q (m^3/sec)
1	1800	2.5	2.55E-09	600	7.3	2.24E-08	600	7.2	2.21E-08
2	1800	1.4	1.43E-09	600	6.8	2.08E-08	600	6.7	2.05E-08
3	1800	1.2	1.23E-09	600	6.4	1.96E-08	600	6.6	2.02E-08
4	1800	1.2	1.23E-09	600	6.3	1.93E-08	600	6.5	1.99E-08
5	1800	1.1	1.12E-09	600	6.0	1.84E-08	600	6.2	1.90E-08
6	66600	11.5	3.17E-10	600	6.0	1.84E-08	600	5.9	1.81E-08
7	1800	1.7	1.74E-09	600	5.8	1.78E-08	600	6.0	1.84E-08
8	1800	1.3	1.33E-09	600	7.3	2.24E-08	600	7.2	2.21E-08
9	1800	1.2	1.23E-09	-	-	-	-	-	-
10	1800	1.1	1.12E-09	-	-	-	-	-	-
11	1800	1.1	1.12E-09	-	-	-	-	-	-
12	1800	1.3	1.33E-09	-	-	-	-	-	-
13	1800	0.5	5.11E-10	-	-	-	-	-	-
14	1800	1.0	1.02E-09	-	-	-	-	-	-
15	1800	0.9	9.19E-10	-	-	-	-	-	-
16	1800	1.0	1.02E-09	-	-	-	-	-	-
17	1800	1.0	1.02E-09	-	-	-	-	-	-
18	1800	1.0	1.02E-09	-	-	-	-	-	-
19	1800	1.0	1.02E-09	-	-	-	-	-	-
20	1800	1.0	1.02E-09	-	-	-	-	-	-
21	1800	1.0	1.02E-09	-	-	-	-	-	-
22	1800	2.5	2.55E-09	-	-	-	-	-	-

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

ตารางที่ ค.1 การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตทั่วไป W/C เท่ากับ 0.55 บ่มอุณหภูมิในน้ำที่สภาพอุณหภูมิทั่วไป ทดสอบที่อายุ 28 วัน

No.	Sample 1			Sample 2			Sample 3		
	L=4.00cm, d=10.00			L=4.00cm, d=10.01			L=4.01cm, d=10.00		
	Δt (sec)	Δh (cm)	Q (m^3/sec)	Δt (sec)	Δh (cm)	Q (m^3/sec)	Δt (sec)	Δh (cm)	Q (m^3/sec)
1	21610	0.7	5.96E-11	21610	0.8	6.81E-11	21,610	1.3	1.11E-10
2	68500	1.6	4.29E-11	68500	1.7	4.56E-11	68,500	1.1	2.95E-11
3	76900	1.3	3.11E-11	76900	1.3	3.11E-11	76,900	0.7	1.67E-11
4	24580	0.5	3.74E-11	24580	0.3	2.24E-11	24,580	0.5	3.74E-11
5	65800	1.1	3.07E-11	65800	1.2	3.35E-11	65,800	0.4	1.12E-11
6	14980	0.3	3.68E-11	14980	0.3	3.68E-11	14,980	0.3	3.68E-11
7	79520	1.1	2.54E-11	79520	1.1	2.54E-11	79,520	0.4	9.25E-12
8	76240	0.9	2.17E-11	76240	0.8	1.93E-11	76,240	0.3	7.23E-12
9	34060	0.4	2.16E-11	34060	0.4	2.16E-11	34,060	0.8	4.32E-11
10	53400	0.6	2.07E-11	53400	0.7	2.41E-11	53,400	0.2	6.89E-12
11	9700	0.1	1.90E-11	9700	0.1	1.90E-11	9,700	0.7	1.33E-10
12	156200	1.3	1.53E-11	156200	1.4	1.65E-11	156,200	0.3	3.53E-12
13	42400	0.5	2.17E-11	42400	0.5	2.17E-11	42,400	0.4	1.73E-11
14	52300	0.6	2.11E-11	52300	0.6	2.11E-11	52,300	0.2	7.03E-12
15	47020	0.4	1.56E-11	47020	0.4	1.56E-11	47,020	0.5	1.96E-11
16	47890	0.6	2.30E-11	47890	0.6	2.30E-11	47,890	0.2	7.68E-12
17	28870	0.3	1.91E-11	28870	0.4	2.55E-11	28,870	0.2	1.27E-11
18	46750	0.5	1.97E-11	46750	0.4	1.57E-11	46,750	0.3	1.18E-11
19	46180	0.4	1.59E-11	46180	0.5	1.99E-11	46,180	0.1	3.98E-12
20	45680	0.5	2.01E-11	45680	0.4	1.61E-11	-	-	-
21	30120	0.4	2.44E-11	30120	0.3	1.83E-11	-	-	-

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณค่าการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

ตัวอย่างการคำนวณค่าการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

ตัวอย่างที่ 1 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยควบคุมอัตราส่วน AL/B = 0.55 อายุ 28 วัน, No.9

ความหนาของตัวอย่าง (L) =4.0 cm.

เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) = 10.0 cm.

พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง = $(3.14xd^2)/4$ =78.54 $cm.^2$

เส้นผ่านศูนย์กลางของ Manometer (d_m) =1.53 cm.

พื้นที่หน้าตัดของ Manometer = $(3.14xd^2_m)/4$ =1.84 $cm.^2$

Δh ของน้ำใน Manometer = 1.20 cm.

ปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง (v)=1.84x1.20 =2.21 $cm.^3$

ระยะเวลาที่น้ำไหลผ่าน (Δt) =1,800 sec

อัตราการไหล ($Q=v/\Delta t=2.21x10^{-6}/1,800$) =$1.23x10^{-9}$ m^3/s

ความหนาแน่นของน้ำ (ρ) =1,000 kg/m^3

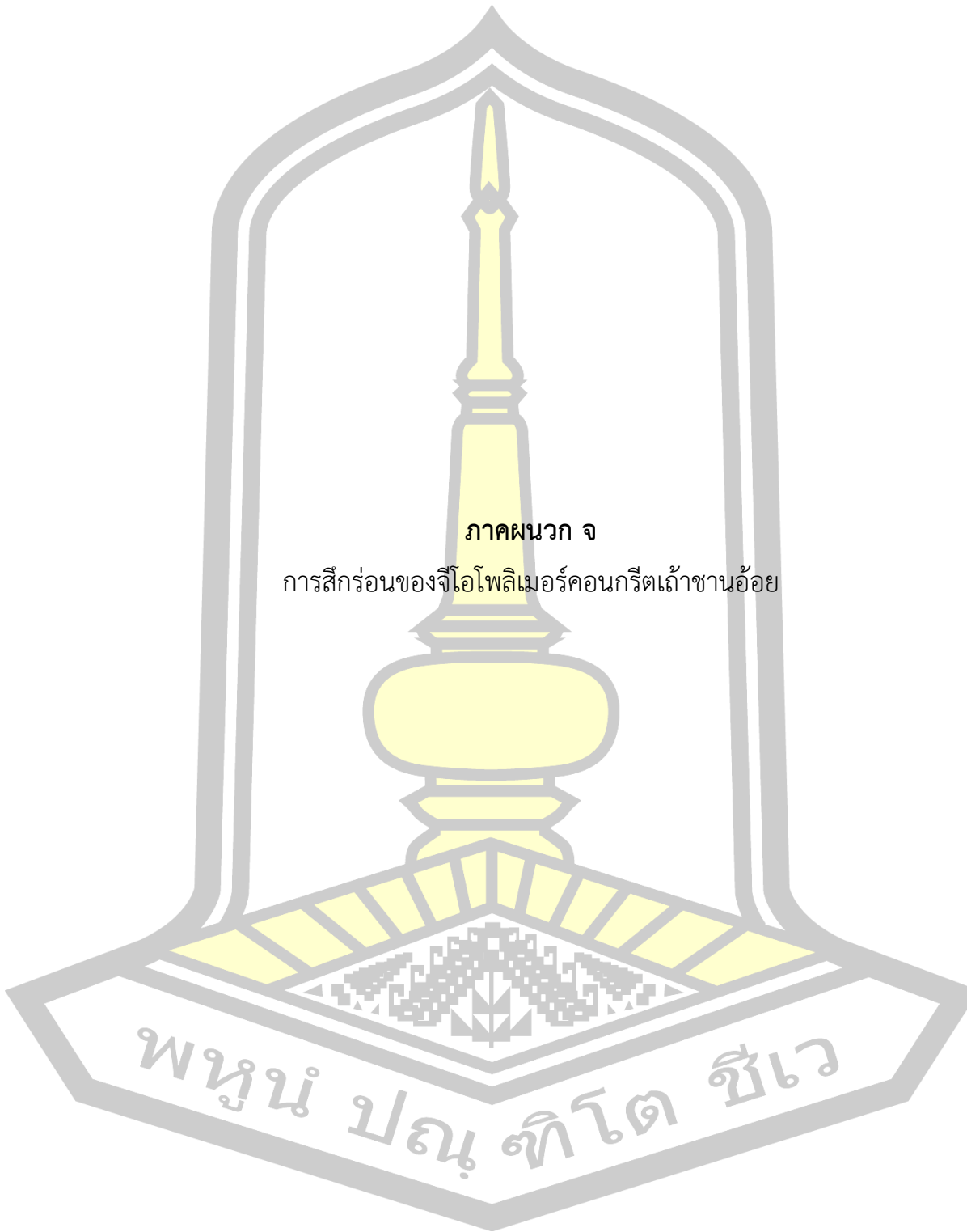
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) =9.81 m/sec^2

แรงดันน้ำสัมบูรณ์ (P)= 1 บาร์ =100,000 N/m^2

การซึมผ่านน้ำ, $k= \rho LgQ/PA$

$$=\frac{1,000x0.04x9.81x1.23x10^{-9}}{100,000x78.54x10^{-4}}$$

$=2.55x10^{-10}$ m/s



ภาคผนวก จ

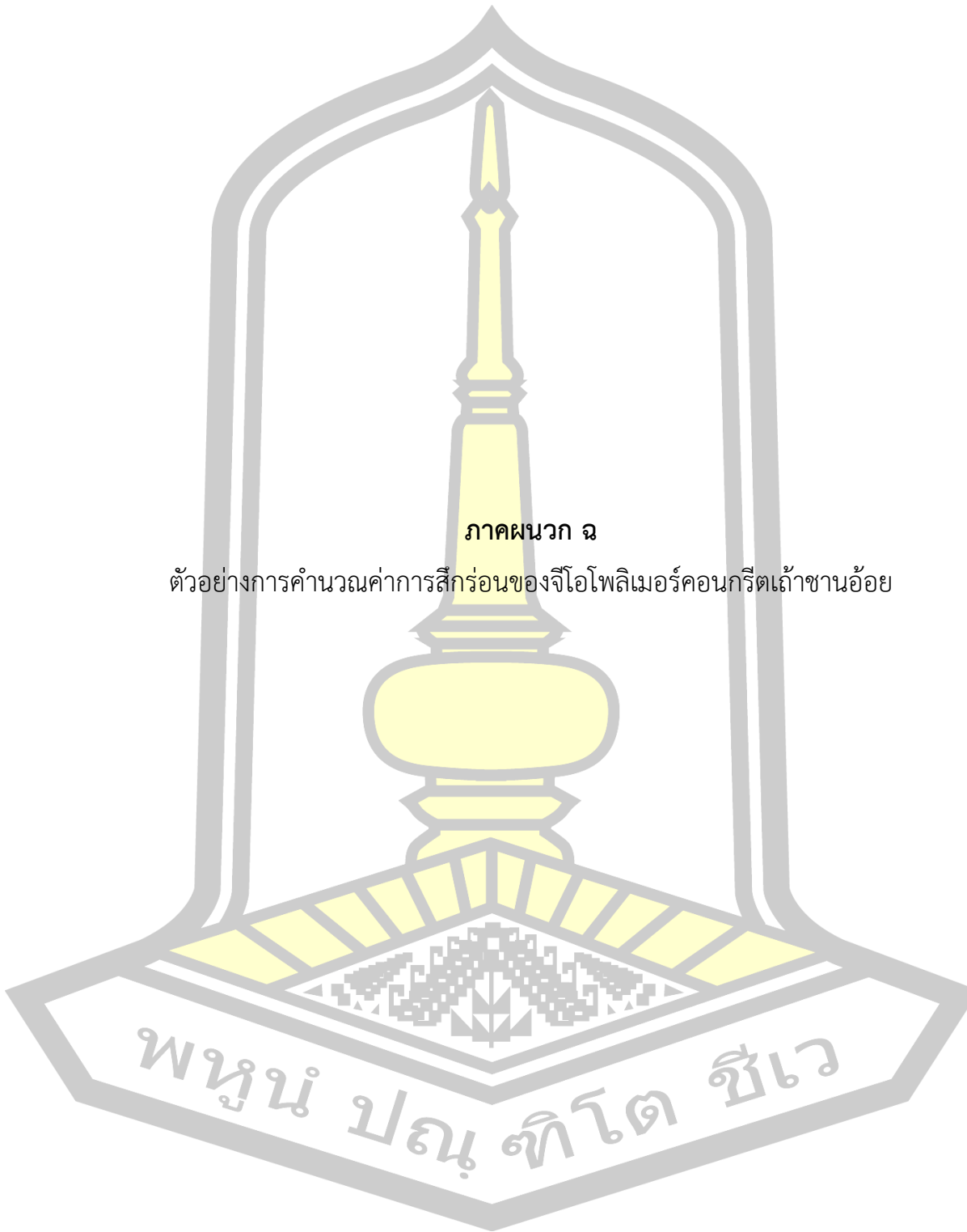
การสึกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

ตารางที่ จ.1 การสึกกร่อนของคอนกรีตทั่วไป AL/B เท่ากับ 0.55 บ่มอุณหภูมิห้องทดสอบที่อายุ 28 วัน

Time (hr)	W_{air} (kg)	W_{water} (kg)	G_w (kg/m^3)	V_i (m^3)	V_t (m^3)	VL_t (m^3)
0	15.184	8.425	1000	0.00676		0
12	15.114	8.420	1000	Sample1	0.006694	0.00006
24	14.897	8.299	1000		0.006598	0.00016
36	14.707	8.204	1000		0.006503	0.00026
48	14.564	8.141	1000		0.0064225	0.00034
60	14.399	8.063	1000		0.0063361	0.00042
72	14.234	7.984	1000		0.0062497	0.00051
0	15.281	8.531	1000	0.00675		0
12	15.078	8.445	1000	Sample2	0.006633	0.00012
24	14.862	8.344	1000		0.006518	0.00023
36	14.655	8.253	1000		0.006401667	0.00035
48	14.445	8.160	1000		0.006285667	0.00046
60	14.236	8.066	1000		0.006169667	0.00058
72	14.026	7.973	1000		0.006053667	0.00070
0	15.332	8.554	1000	0.00678		0
12	15.019	8.403	1000	Sample3	0.006616	0.00016
24	14.845	8.310	1000		0.006535	0.00024
36	14.671	8.217	1000		0.006454	0.00032
48	14.497	8.124	1000		0.006373	0.00041
60	14.323	8.031	1000		0.006292	0.00049
72	14.149	7.938	1000		0.006211	0.00057

ตารางที่ จ.2 การสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยควบคุม Al/B เท่ากับ 0.55 บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทดสอบที่อายุ 28 วัน

Time (hr)	W_{air} (kg)	W_{water} (kg)	G_w (kg/m^3)	V_i (m^3)	V_t (m^3)	VL_t (m^3)
0	15.521	8.713	1000	0.00681		0
12	15.281	8.579	1000	Sample1	0.00670176	0.00011
24	15.061	8.474	1000		0.006587	0.00022
36	15.058	8.472	1000		0.006586	0.00022
48	14.828	8.353	1000		0.0064755	0.00033
60	14.659	8.275	1000		0.0063846	0.00042
72	14.491	8.197	1000		0.0062937	0.00051
0	15.953	8.953	1000	0.00700		0
12	15.878	8.917	1000	Sample2	0.006961	0.00004
24	15.81	8.881	1000		0.006929	0.00007
36	15.716	8.832	1000		0.006884	0.00012
48	15.645	8.796	1000		0.0068485	0.00015
60	15.567	8.7561	1000		0.0068105	0.00019
72	15.489	8.716	1000		0.0067725	0.00023
0	15.263	8.587	1000	0.00668		0
12	15.180	8.552	1000	Sample3	0.006628	0.00005
24	15.160	8.543	1000		0.006617	0.00006
36	15.149	8.536	1000		0.006613	0.00006
48	15.0975	8.514	1000		0.0065835	0.00009
60	15.061	8.498	1000		0.0065635	0.00011
72	15.025	8.482	1000		0.0065435	0.00013



ภาคผนวก ฉ

ตัวอย่างการคำนวณค่าการสึกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

ตัวอย่างการคำนวณค่าการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

ตัวอย่างที่ 1 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยควบคุมอัตราส่วน AL/B = 0.55 อายุ 28 วัน, Sample1 รอบที่ 6 ระยะเวลา 72 ชั่วโมง

น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (W_{air} กิโลกรัม) =16.517 kg

น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (W_{water} กิโลกรัม) =9.527 kg

หน่วยน้ำหนักของน้ำ (G_w) =1,000 kg/m^3

ปริมาตรของตัวอย่าง ก่อนการทดสอบการขัดสี (V_i)

$$V_i = \frac{W_{air}-W_{water}}{Gw} = \frac{16.517-9.527}{1,000}$$ =0.00699 m^3

น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (W_{air} กิโลกรัม) =15.817 kg

น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (W_{water} กิโลกรัม) =9.130 kg

หน่วยน้ำหนักของน้ำ (G_w) =1,000 kg/m^3

ปริมาตรของตัวอย่าง ณ ระยะเวลาที่ต้องการ (V_t ลูกบาศก์เมตร)

$$V_t = \frac{W_{air}-W_{water}}{Gw} = \frac{15.817-9.130}{1,000}$$ =0.00669 m^3

ปริมาตรของตัวอย่าง ที่สูญเสียโดยการขัดสี (VL_t)

$VL_t = V_i - V_t$ =0.00699-0.00669 =0.0030 m^3

พื้นที่หน้าตัดด้านบนของตัวอย่าง (A) $= \frac{3.14 \times 0.30^2}{4}$ =0.0707 m^2

ค่าเฉลี่ยความลึกของการขัดสี (ADA_t)

$ADA_t = VL_t/A = \frac{0.0030}{0.0707}$ =0.0043 m

ภาคผนวก ช

รูปถ่ายการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

รูปที่ ซ1 ค่าการยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

รูปที่ ซ2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เถ้าชานอ้อย

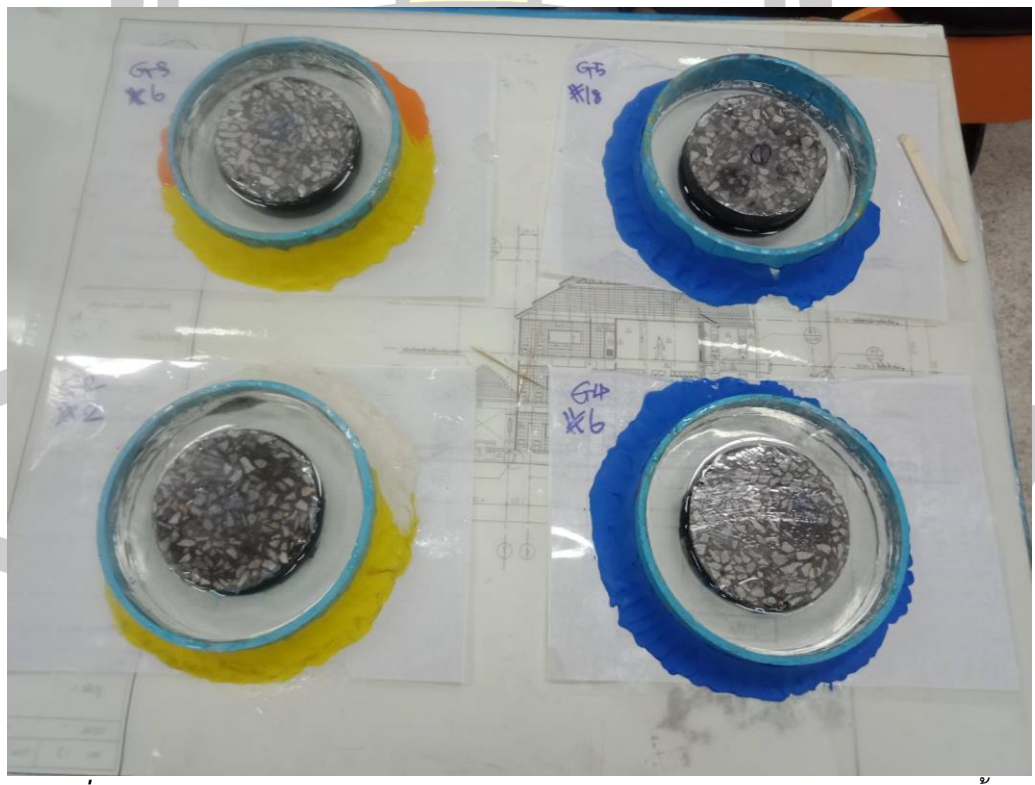
รูปที่ ซ3 การทดสอบการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เถ้านชานอ้อยมอร์ต้าร์

รูปที่ ซ4 ตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยก่อนบ่มร้อน

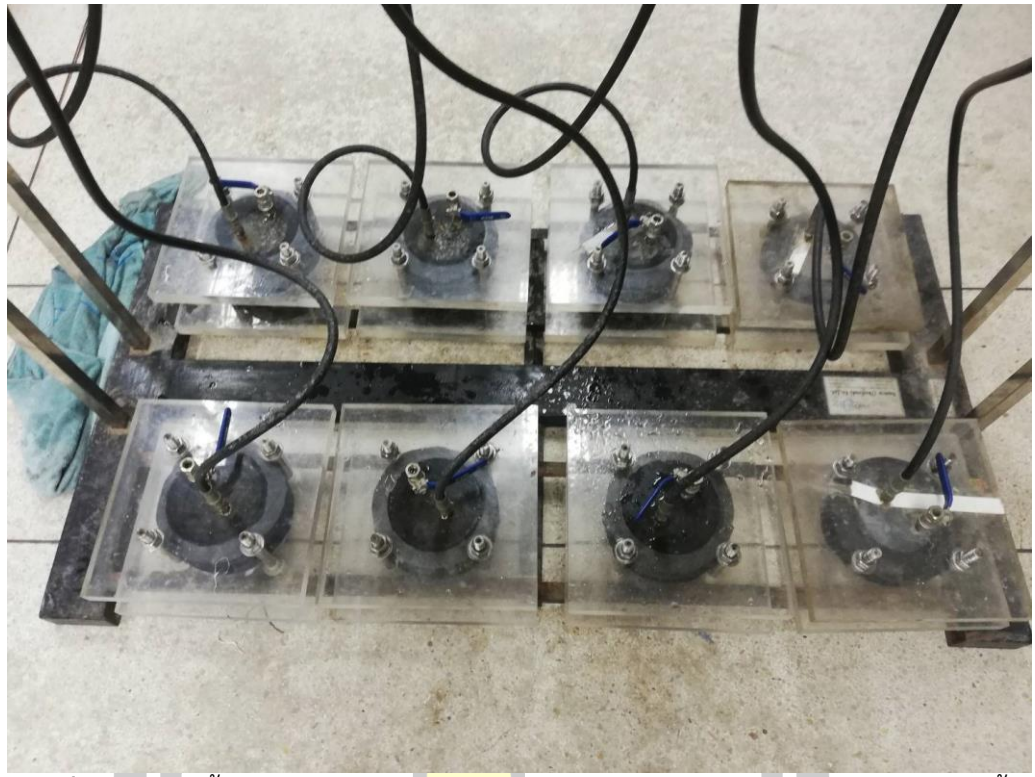
รูปที่ ซ5 ตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยบ่มร้อนในตู้อบไฟฟ้า

รูปที่ ซ6 ตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุการทดสอบ

รูปที่ ช7 ลักษณะการพังเสียหายจากการทดสอบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย



รูปที่ ช8 เตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยสำหรับทดสอบการซึมผ่านน้ำ



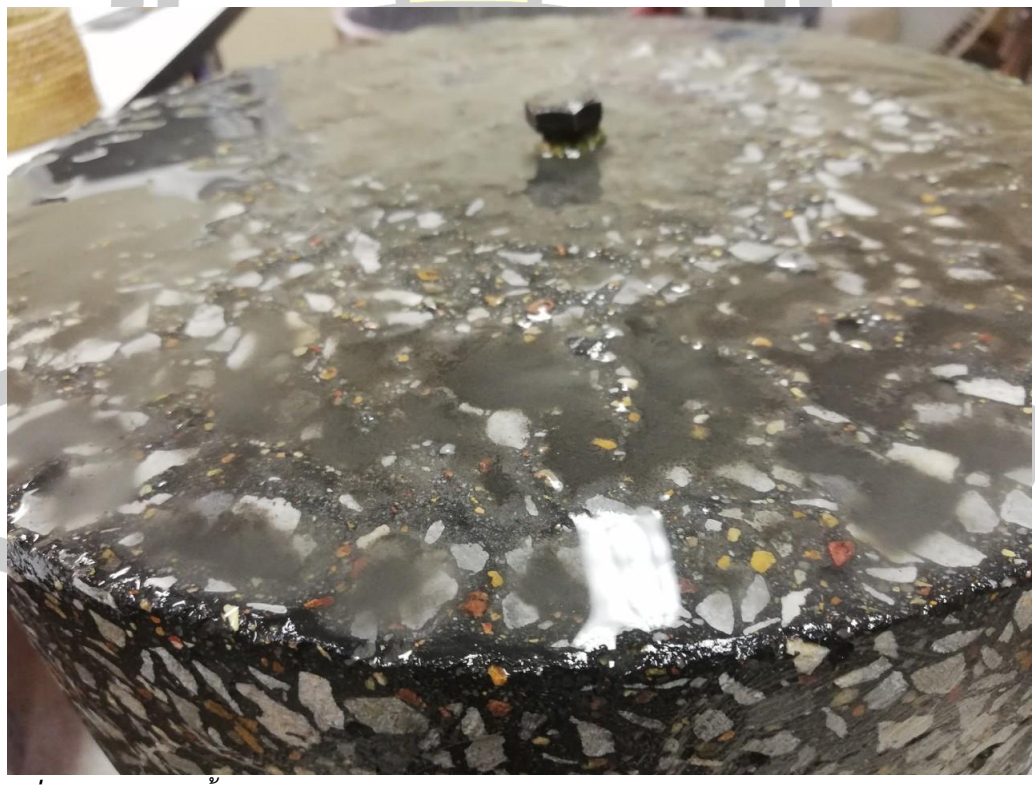
รูปที่ ช9 การติดตั้งตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยสำหรับทดสอบการซึมผ่านน้ำ

รูปที่ ช10 การทดสอบการซึมผ่านน้ำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

รูปที่ ช11 เตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยสำหรับทดสอบการสึกกร่อน

รูปที่ ช12 ทดสอบการสึกกร่อนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อย

รูปที่ ช13 ชั่งน้ำหนักจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยหลังการทดสอบแต่ละรอบ



รูปที่ ช14 ลักษณะพื้นผิวการสึกกร่อนของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเถ้าชานอ้อยหลังทดสอบ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ทรงฤทธิ์ พุทธลา
วันเกิด	13 มีนาคม 2525
สถานที่เกิด	ขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	43 หมู่ 5 ตำบล น้ำพอง อำเภอ น้ำพอง จังหวัดขอนแก่น 40310
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกรโยธา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2564 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2560 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	-

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว