



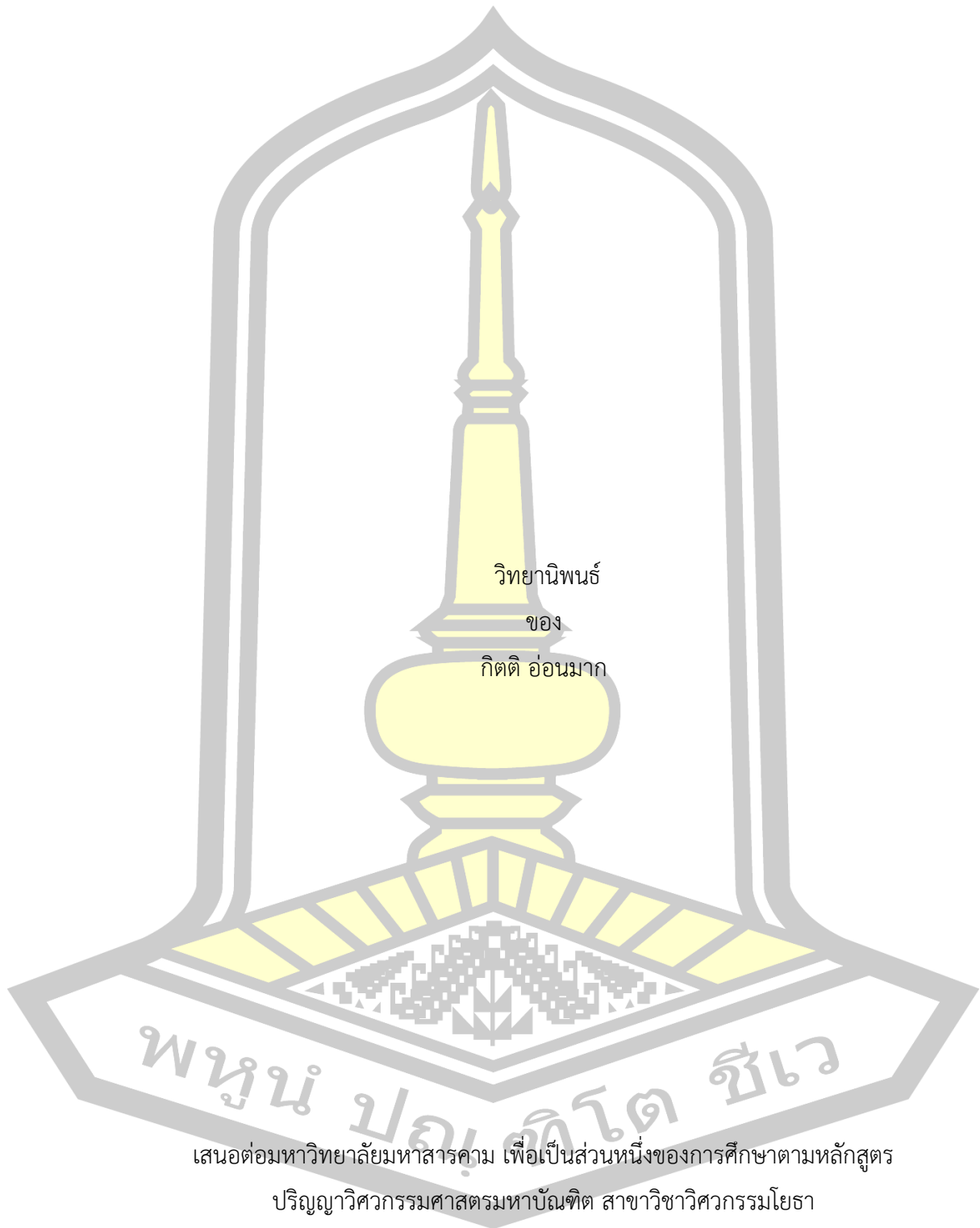
การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

วิทยานิพนธ์
ของ
กิตติ อ่อนมาก

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
กันยายน 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม



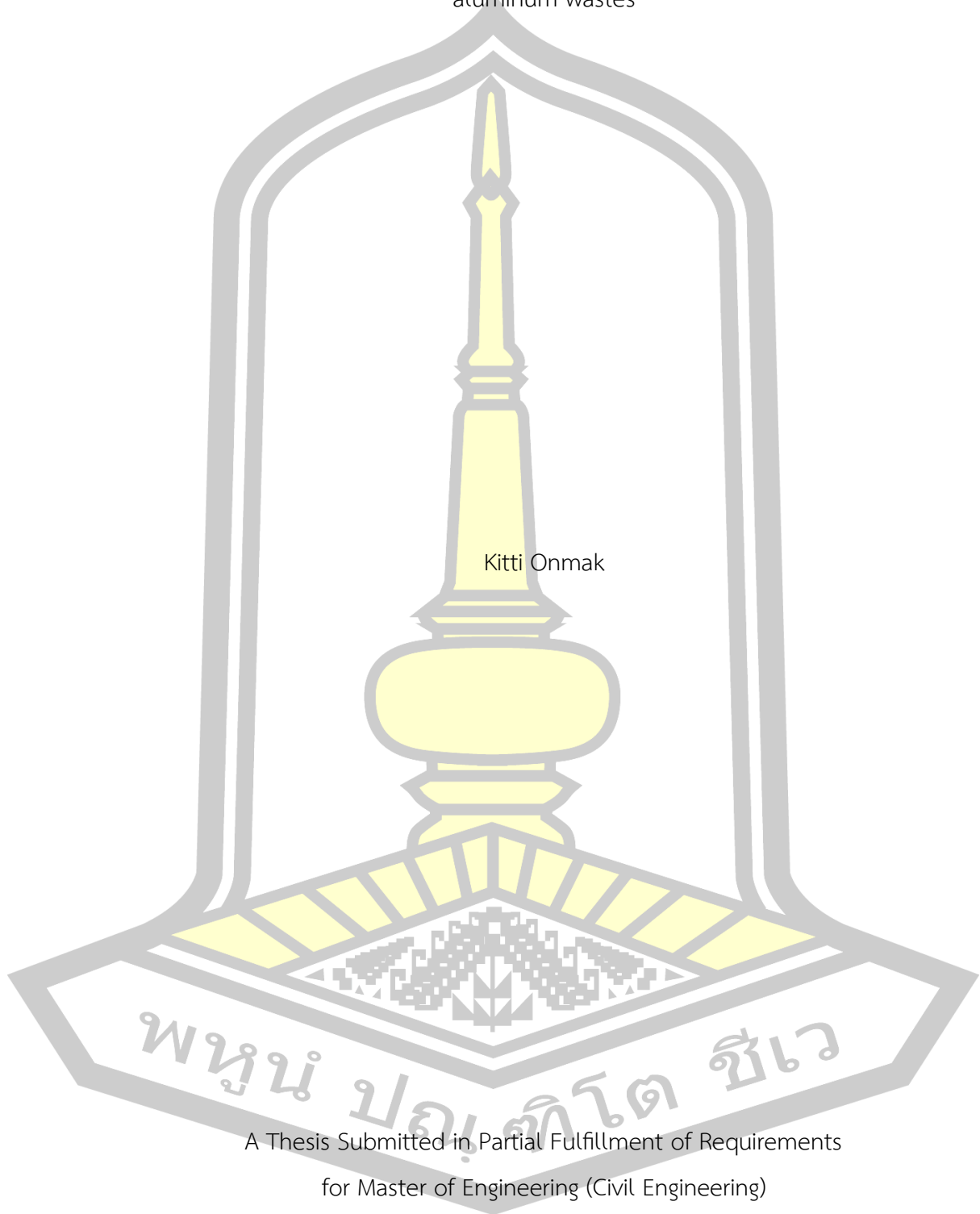
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

กันยายน 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Compressive Strength of geopolymer produced from bagasse ash blended with
aluminum wastes



Kitti Onmak

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

September 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกิตติ อ่อนมาก แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ชีรวัดน์ สิ้นศิริ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สหलग หอมวุฒิวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม)

กรรมการ

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

พจน บัณฑิต ชีวะ

ชื่อเรื่อง	การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม		
ผู้วิจัย	กิตติ อ่อนมาก		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยชาญ โชติถนอม		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในเรื่องพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมเพื่อหาปัจจัยที่จะใช้ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้า ดังกล่าวได้มีกำลังอัดสูงสุดและดีที่สุด จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนา กำลังของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าโดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องของจำนวน 6 ตัวแปรดังนี้ ตัวแปรที่หนึ่ง คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 7.5 10.0 12.5 และ 15 โมลาร์ ความเข้มข้นที่ทำให้จีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมมีกำลังอัดสูงคือ ที่ 10 โมลาร์ ตัวแปรที่สอง คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในผลการทดสอบ 5 6 7 และ 8 ซึ่งปริมาณของน้ำที่ทำให้จีโอโพลีเมอร์มอร์ต้ามีกำลังอัดที่ดีคือร้อยละ 5 ของน้ำหนักของเถ้าชานอ้อย ตัวแปรที่สาม คือ ปริมาณของเศษอะลูมิเนียมที่เหมาะสมกับการพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม-จากผลการทดสอบร้อยละ 0.0-0.06 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ตัวแปรที่สี่ คือ อัตราส่วนของ AL/8A ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน AL/BA ร้อยละ 0.56A-ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดดังนั้น AL/BA ร้อยละ 0.56A จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้ผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม-ตัวแปรที่ห้า"คือ อุณหภูมิสำหรับการบ่ม ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่มีค่ากำลังสูงสุดคือที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่หก คือ อัตราส่วนของ N/NS ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของ NH/NS อยู่ที่ช่วง 50:50 และ 55:45 ทั้งแปรผันกับปริมาณของเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.04-0.06 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 556.98 กก/ตร.ซม.

คำสำคัญ : จีโอโพลีเมอร์, เถ้าชานอ้อย, วัสดุเหลือทิ้ง, กำลังอัด

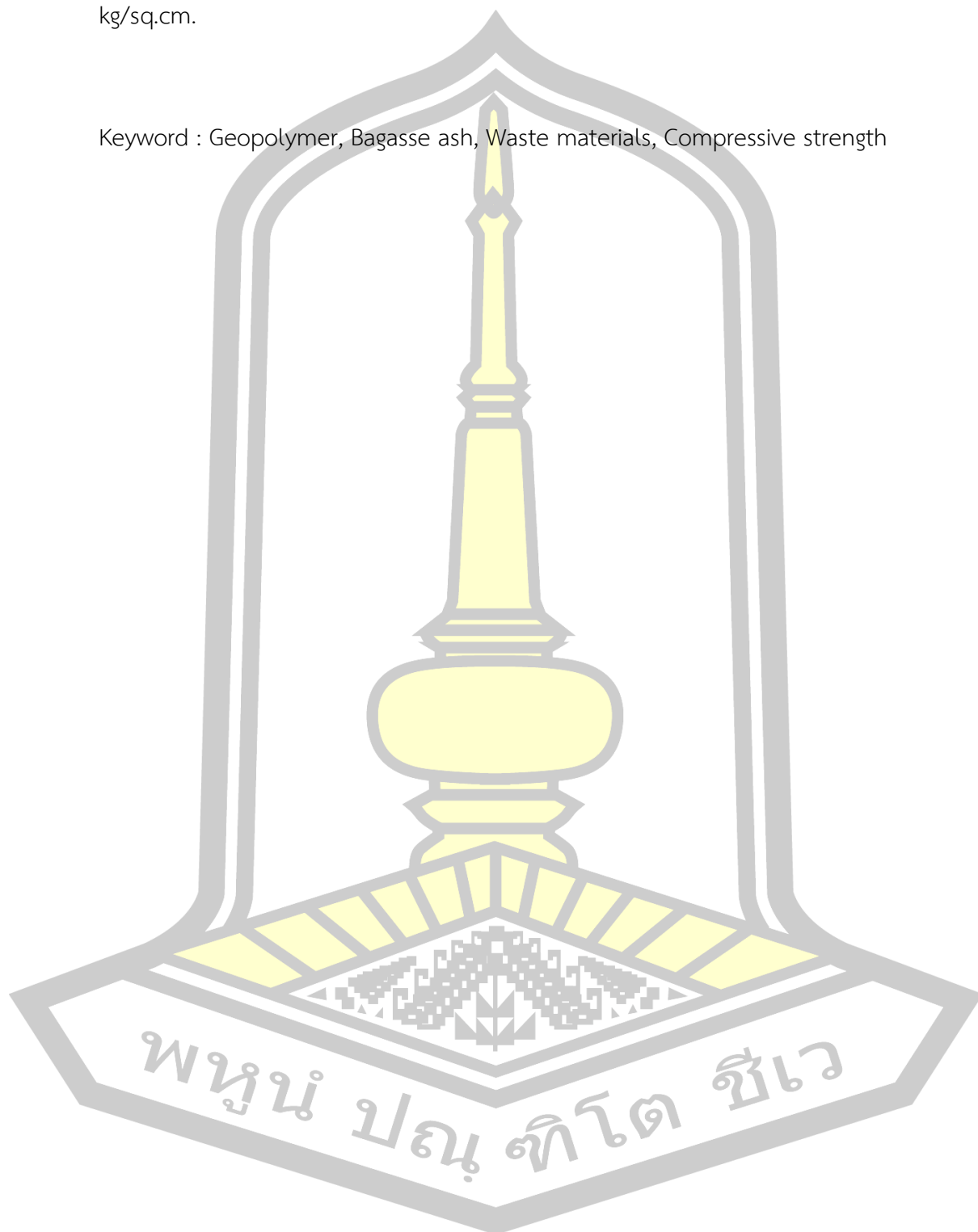
TITLE	Compressive Strength of geopolymer produced from bagasse ash blended with aluminum wastes		
AUTHOR	Kitti Onmak		
ADVISORS	Associate Professor Sahalaph Homwouttiwong , Ph.D. Assistant Professor Chaicharn Chotetanorm , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

This research is a study on the development of compressive strength of polymer mortar from bagasse ash mixed with aluminum scraps. In order the ratio of the Geopolymers that has the highest compressive strength and the best is important to study the different variables that have an influence on the development of the Geopolymer. In this research, 6 variables are defined as follows. One is the concentration of sodium hydroxide solution at 7.5, 10, 12.5 and 15 molars. The concentration that causes the geopolymer mortar from bagasse ash mixed with aluminum scraps have a high compressive strength which is at 10 molar. The second is the amount of aluminum scrap that is suitable for the compressive strength development of geopolymer mortar from bagasse ash mixed with aluminum scraps. From the test result of 0.04-0.06 percent, the maximum compressive strength. The optimum ratio of AL/BA to the development of geopolymers bagasse ash mixed with aluminum scraps. From the results, it is found that the ratio of AL/BA at 0.5BA percent gives the highest compressive strength. It is suitable for use in the production of geopolymer mortar, bagasse ash mixed with aluminum scraps. The fourth temperature for curing suitable for the development of polymer mortar from bagasse ash mixed with aluminum scraps. From the study was found that the optimum temperature with the highest power was at 80 degrees celsius. The fifth, NH/NS ratio suitable for the development of geopolymer mortar from bagasse ash mixed with aluminum scraps. From the results, it was found that the ratio of NH/NS at 55:45 and the amount of

aluminum scraps 0.06 percent gave the maximum compressive strength of 556.98 kg/sq.cm.

Keyword : Geopolymer, Bagasse ash, Waste materials, Compressive strength



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สหลาก หอมวุฒิมังค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม ที่ได้ให้ความกรุณาเสียสละเวลาแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีตลอดมา ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กริสน์ ชัยมูล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพพล เสี่ยมศักดิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ เสนอข้อคิดเห็น ข้อปรับปรุงและแนวทางที่เป็นประโยชน์ รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ให้คำปรึกษา และประสบการณ์ที่มีคุณค่ายิ่ง ตลอดจนการอำนวยความสะดวกในทุก ๆ ด้าน ตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษา ขอขอบคุณ พี่ ๆ และน้อง ๆ นิสิตปริญญาเอก ปริญญาโท และปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจ และมีความหวังใจที่ดีตลอดมา ผู้วิจัยขออุทิศความดีที่เกิดจากการศึกษาในครั้งนี้ให้กับผู้มีพระคุณดังกล่าวทุกท่าน

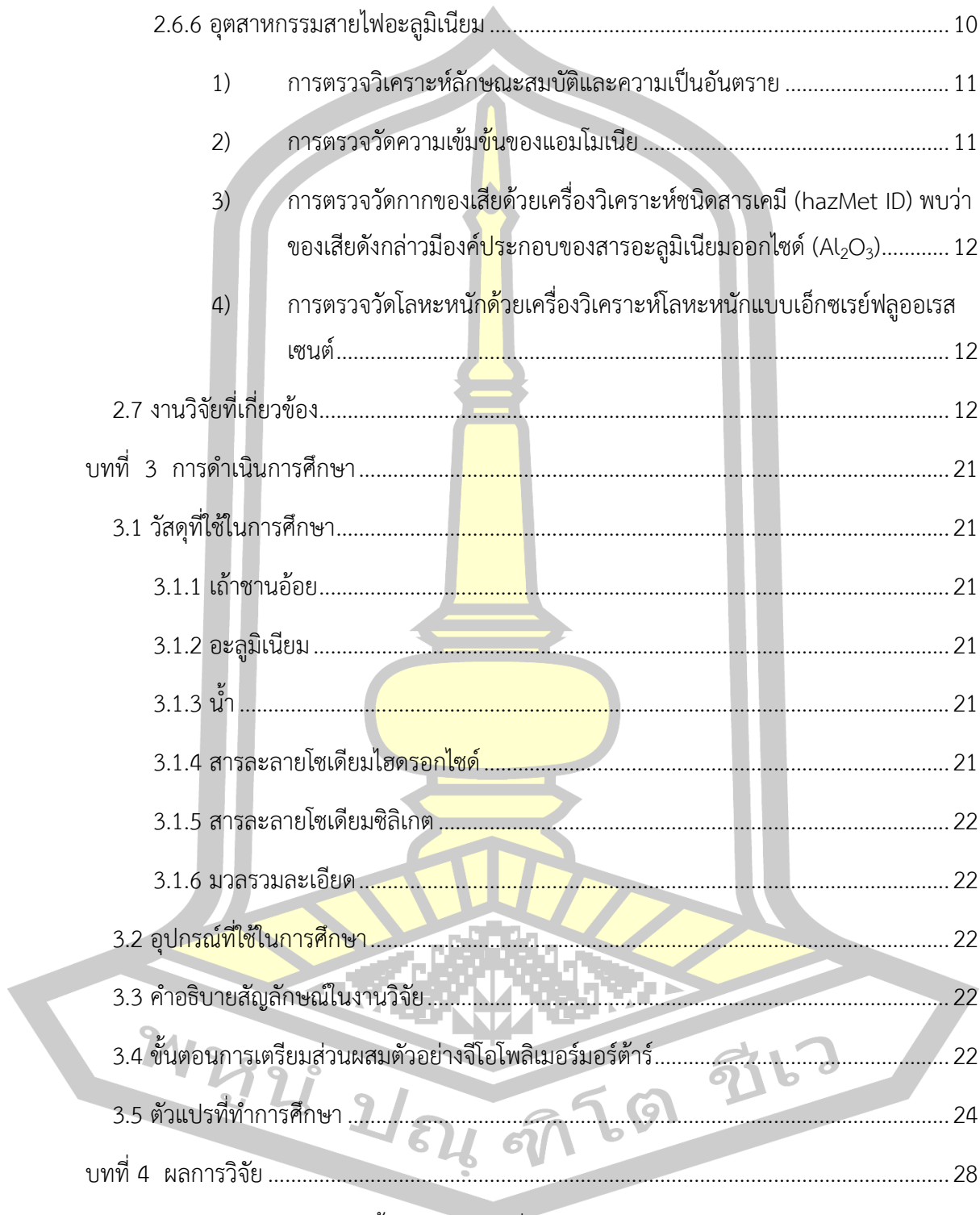
กิตติ อ่อนมาก



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาของปัญหาและความสำคัญ.....	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 จีโพลิเมอร์.....	4
2.2 กระบวนการจีโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation).....	5
2.3 วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan materials).....	6
2.4 สารละลาย (Solution).....	6
2.4.1 สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์.....	6
2.4.2 สารประกอบซิลิเกต.....	6
2.5 แก้วขานอ้อย.....	7
2.6 ปริมาณการใช้อะลูมิเนียมในประเทศไทย.....	8
2.6.1 อุตสาหกรรมหลอมเศษอะลูมิเนียม.....	9
2.6.2 อุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมในประเทศไทย.....	9
2.6.3 อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมหน้าตัด.....	9
2.6.4 อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมแผ่นและฟอยล์.....	9

2.6.5	อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียม.....	10
2.6.6	อุตสาหกรรมสายไฟอะลูมิเนียม	10
1)	การตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติและความเป็นอันตราย	11
2)	การตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนีย	11
3)	การตรวจวัดกากของเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ชนิดสารเคมี (hazMet ID) พบว่า ของเสียดังกล่าวมีองค์ประกอบของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃).....	12
4)	การตรวจวัดโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรส เซนซ์.....	12
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3	การดำเนินการศึกษา.....	21
3.1	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	21
3.1.1	เก้าอี้พลาสติก.....	21
3.1.2	อะลูมิเนียม	21
3.1.3	น้ำ	21
3.1.4	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	21
3.1.5	สารละลายโซเดียมซัลเฟต	22
3.1.6	มวลรวมละเอียด	22
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	22
3.3	คำอธิบายสัญลักษณ์ในงานวิจัย.....	22
3.4	ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	22
3.5	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	24
บทที่ 4	ผลการวิจัย	28
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
4.2	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เก้าอี้พลาสติกผสมอะลูมิเนียม	28



บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล.....	40
5.1 ความเข้มข้นของ NH มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์.....	40
5.2 ปริมาณน้ำในสำหรับที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม.....	40
5.3 ปริมาณของเศษอะลูมิเนียมที่เหมาะสมกับการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม.....	40
5.4 อัตราส่วนของ AL/BA ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม.....	41
5.5 อุณหภูมิสำหรับการบ่ม ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม.....	41
5.6 อัตราส่วนของ NH/NS ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม.....	41
บรรณานุกรม.....	42
ประวัติผู้เขียน.....	45
ภาคผนวก.....	46
ภาคผนวก ก.....	47



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อย	7
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเสี้ยวอะลูมิเนียมหรือตะกรัน	12
ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	25
ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ต่อ).....	26
ตารางที่ 5 ผลของเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ NH ที่ 7.5 10 12.5 และ 15 ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม.....	28
ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำในการใช้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการพัฒนากำลังจีโอโพลิเมอร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม	30
ตารางที่ 7 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่ปริมาณของเศษอะลูมิเนียมแตกต่างกัน	31
ตารางที่ 8 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนของ AL/BA แตกต่างกัน.....	34
ตารางที่ 9 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่ใช้ในการบ่ม 60 80 และ 110 องศาเซลเซียส	35
ตารางที่ 10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	36
ตารางที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกัน บ่มที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	37

พูน ปณ ทิโต ชีเว

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 การเกิดสารจีโอโพลีเมอร์.....	5
ภาพประกอบ 2 กระบวนการผลิตอะลูมิเนียม.....	8
ภาพประกอบ 3 กระบวนการหลอมหล่อตะกอนอะลูมิเนียมและสิ่งที่ปล่อยออกจากกระบวนการ ...	11
ภาพประกอบ 4 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์.....	24
ภาพประกอบ 5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	27
ภาพประกอบ 6 แสดงกำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น NH NH ที่ 7.5 10 12.5 และ 15	29
ภาพประกอบ 7 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้ปริมาณน้ำเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการพัฒนา กำลังจีโอโพลีเมอร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม	31
ภาพประกอบ 8 กำลังจีโอโพลีเมอร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่มีปริมาณการเติมเศษ อะลูมิเนียมในอัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 4 5 7 10 12.5 และ 15 ของน้ำหนักเก้าชานอ้อย	32
ภาพประกอบ 9 กำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณของ AL/BA แตกต่างกัน	33
ภาพประกอบ 10 ค่ากำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่การบ่ม อุณหภูมิแตกต่างกัน	35
ภาพประกอบ 11 กำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกันๆ บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	38
ภาพประกอบ 12 กำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกัน บ่มที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	38

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาของปัญหาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้จำนวนประชากรของทุกๆ ประเทศ นับวันมีแต่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดการขาดแคลนที่อยู่อาศัย ดังนั้นจึงมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการก่อสร้างที่อยู่อาศัยให้เพียงพอและวัสดุที่นำมาก่อสร้างที่อยู่อาศัยนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่มั่นคงแข็งแรงและคงทนต่อทุกๆ สภาพอากาศ ซึ่งวัสดุหนึ่งที่มีความนิยมใช้ทำการก่อสร้างอาคารเกือบทุกประเภท คือ คอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมีองค์ประกอบหลักคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุมวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียดและน้ำ ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นสามารถทำได้จากนำวัตถุดิบมาเผาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1400 – 1600 องศาเซลเซียส ซึ่งจะก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศและการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โลกร้อนหรือเกิดภาวะเรือนกระจกขึ้นได้ จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม 2558 ได้เก็บสถิติการผลิตปูนซีเมนต์เฉลี่ยปีละประมาณ 32 ล้านตัน ละในปี พ.ศ. 2558 จากการผลิตปูนซีเมนต์ดังกล่าวก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่ชั้นบรรยากาศ โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะเกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 0.9 ตัน (Benhelal, Zahedi, Shamsaei, & Bahadori, 2013) จากปัญหาของการผลิตปูนซีเมนต์ที่ส่งผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จึงได้มีการวิจัยหลายๆ ท่านที่พยายามค้นคว้าหาวัสดุเพื่อใช้เป็นสารซีเมนต์ทดแทนปูนซีเมนต์โดยทุกๆ งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่นำวัสดุที่เป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ ที่สามารถนำกลับมาหมุนเวียนเปลี่ยนสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มาโดยไม่มีค่าใช้จ่าย พร้อมทั้งเป็นการบริหารจัดการกากเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมซึ่งแต่เดิมใช้วิธีการฝังกลบหรือทำลายด้วยวิธีการต่างๆ ตามแต่กากของเสียนั้นๆ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังกล่าวนี้ และวัสดุที่เป็นกากของเสียที่นำมาใช้ทดแทนสารซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์จะเรียกว่าเป็นวัสดุปอร์ตโซลาน (Porzoland) อาทิเช่น เถ้าถ่านหินเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้า เถ้าขี้เถ้าของเสียจากการผลิตของโรงงานน้ำตาล เถ้าแกลบจากโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลและอื่นๆ การนำวัสดุปอร์ตโซลานเหล่านี้ไปผสมเพื่อทดแทนปริมาณของปูนซีเมนต์ยังอยู่ในช่วง 10 – 20% ถือว่าการนำกากของเสียมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของกากของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น ดังนั้นในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Gluhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ได้คิดค้นการนำวัสดุผสมอโมอร์ฟิเคตที่มีลักษณะของโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ถือว่าเป็น

การค้นพบครั้งแรก ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1970 นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ชื่อ Prof. Joseph Davidovits กล่าวถึงคุณลักษณะของจีโอโพลิเมอร์ว่าเป็นวัสดุทำหน้าที่เชื่อมประสานชนิดหนึ่งโดยมีส่วนผสมของแร่ธาตุทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปออสซิลาน โดยมีชื่อเรียกว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide, Al_2O_3) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นหลัก (Xu, Ji, Gao, Yang, & Wu, 2018) โดยใช้สารละลายที่เป็นด่างสูงทำปฏิกิริยากับอันคาโลนที่ทำให้แตกตัวหรือแยกออกจากกัน ในที่นี้จะใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na_2SiO_3) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) ร่วมกับการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการก่อตัวจนไปถึงสภาวะที่แข็งตัวและมีคุณสมบัติในการรับกำลังอัดได้เป็นอย่างดี โครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์จะมีลักษณะที่แตกต่างจากการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานวัสดุ

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุปอซโซลาน มาใช้เป็นสารตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์และที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) รองลงมาคือ ดินขาวเผาหรือเมทาเคอลิน (Metakaolin) ในประเทศไทยได้มีการสนับสนุนให้ประชากรในพื้นที่ราบสูงปลูกพืชไร่และถือเป็นพืชทางเศรษฐกิจนั้นก็คือ อ้อย ซึ่งในภาคอีสานได้มีการปลูกอ้อยจำนวนมาก และมีโรงงานผลิตน้ำตาลที่ผลิตกากเหลือทิ้งที่นำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน คือ เถ้าขานอ้อย (Bagasse ash) ที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการใช้ขานอ้อยที่เหลือทิ้งจากการบีบน้ำหวานออกแล้ว มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาให้ความร้อนนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า จากสถิติพบว่าในแต่ละปีมีเถ้าขานอ้อยโดยประมาณ 1,030,000 ตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561) การกำจัดเถ้าขานอ้อยนี้ใช้วิธีนำไปฝังกลบซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่อนข้างสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เถ้าขานอ้อยที่มีปริมาณเหลือทิ้งจำนวนมากและเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้ง จากการศึกษาพบว่าเถ้าขานอ้อยมีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 ในปริมาณที่สูง แต่มีปริมาณของ Al_2O_3 ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีความต้องการ Al_2O_3 จากแหล่งอื่นมาใช้ปรับอัตราส่วนผสมระหว่าง $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยพบว่าในอุตสาหกรรมการก่อสร้างจะมีกากของเสียอะลูมิเนียมเป็นจำนวนมากซึ่งเกิดจากการผลิตอะลูมิเนียม 360 ตัน/ปี (Onutai, Jiemsirilers, Thavorniti, & Kobayashi, 2015)

จากการเจริญเติบโตของเมืองและการเพิ่มจำนวนประชากร ทำให้ทรัพยากรทางธรรมชาติอย่างป่าไม้มีไม่เพียงพอกับความต้องการที่จะนำไม้มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างอย่าง เช่น วงกบ บานประตู หน้าต่าง วัสดุตกแต่งหรือโครงสร้างที่รับน้ำหนักเบา ดังนั้นอะลูมิเนียมจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ตกแต่งอาคารหรือแม้กระทั่งภาชนะบรรจุของ ซึ่งนับวันจะมีแนวโน้มการใช้โลหะอะลูมิเนียมของประเทศไทยสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง ไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์ และยานยนต์ เป็นต้น ทำให้ในแต่ละปีต้องพึ่งพาการนำเข้าโลหะอะลูมิเนียมจากต่างประเทศกว่า 550,000 ตัน หรือคิดเป็นมูลค่าเกือบ 50,000 ล้านบาท (กิตติ

พันธ์ บายี่ขัน, 2558) ซึ่งจากการใช้อะลูมิเนียมในการผลิตสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้เกิดกากของเสียจากกระบวนการผลิตอยู่ 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนการหลอมอะลูมิเนียมหรือกระบวนการของการเคลือบสีให้แก่ผิวอะลูมิเนียม ขั้นตอนที่สอง คือ ขั้นตอนการตัดแต่งชิ้นงานเพื่อผลิต วงกบประตู หน้าต่าง บานประตูหน้าต่าง งานตกแต่งหรือประดับ และที่ใส่บรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาและวิจัยเป็นแนวทางเพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้ดีขึ้น



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

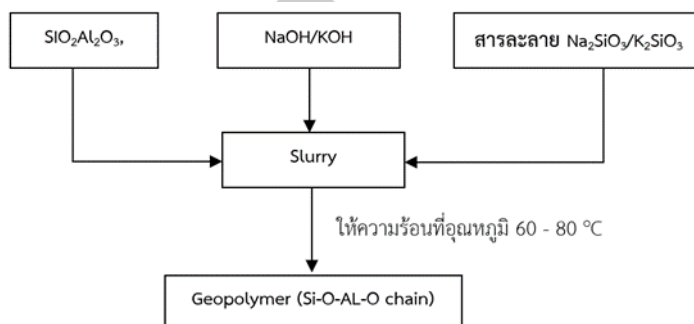
2.1 จีโอโพลิเมอร์

ในปี ค.ศ. 1950 ได้มีการค้นพบวัสดุที่มีส่วนผสมอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีลักษณะของโครงสร้างวัสดุผสมเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) ค้นพบครั้งแรกโดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ซึ่งได้จากโครงของสารประกอบจีโอโพลิเมอริกอนินทรีย์ หลังจากนั้นไม่นาน ในปี ค.ศ.1970 Prof. Joseph Davidovits นักเคมีชาวฝรั่งเศส ให้คำจำกัดความของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นเป็นครั้งแรก ซึ่งอธิบายลักษณะของจีโอโพลิเมอร์ไว้ดังนี้ คือ เป็นวัสดุเชื่อมประสานอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการนำวัสดุปอซโซลานมาผสม โดยวัสดุปอซโซลานจะต้องมีแร่ธาตุรูปส่วนประกอบทางเคมีของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก เมื่อผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งเป็นอัลคาไลหรือสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงมาทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุ เกิดการแตกตัวแล้วเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อน จะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวให้สามารถรับกำลังอัดได้ (Puttala, Hiranphattararoj, & Homwuttivong, 2021) หากนำโครงสร้างทางปฏิกิริยาเคมีของการเกิดซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์มาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นได้ว่า ทั้งสองมีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง กล่าวคือ ลักษณะโครงสร้างของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) ตามสมการ (2.1) มีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพส หรือ มอร์ต้าที่แข็งตัวแล้ว โดยเมื่อนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่สองขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังสมการ (2.2) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551)



จีโอโพลิเมอร์มีลักษณะของโครงสร้าง ซิลิเกต (Si) อะลูมินา (Al) และออกซิเจน (O) องค์ประกอบหลัก เกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตก

ตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย (Aleem & Arumairaj, 2012)



ภาพประกอบ 1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์

(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551)

โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่แตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ของสารตั้งต้น โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์แสดงดัง สมการ (2.3)



โดย M คือ ธาตุออลูมิเนียม เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca)

- คือ การยึดเกาะ (bond)

n คือ อันดับของการโพลิคอนเดนเซชัน (Degree of polycondensation) บ่งบอกปริมาณการทำโมเลกุลลูกโซ่

Z คือ 1, 2, ..., 32

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

2.2 กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation)

กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) คือ กลไกปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดจีโอโพลิเมอร์ โดยมีขั้นตอนแรกคือ การละลาย (Dissolution) เป็นการเปลี่ยนวัสดุที่มีสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต (Solid aluminosilicate source) ที่เป็นของแข็งให้เป็นสารสังเคราะห์อัลคาไลน์ อลูมิเนียมซิลิเกต (Synthetic alkali aluminosilicate) โดยใช้สารละลายด่างที่มีไอออนไฮดรอกไซด์เข้าไปทำการละลายจะได้สารอะลูมิเนียมและซิลิเกต โดยการละลายของอนุภาคของแข็งที่พื้นผิวเป็นผลให้อะลูมิเนียมและซิลิเกตปลดปล่อยเป็นอิสระ ในรูปของโมโนเมอร์อยู่ในสารละลาย ทำให้ได้

ส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารซิลิเกต อะลูมิเนต และอะลูมิโนซิลิเกต ที่อยู่ในสภาวะสารละลายที่มีสภาวะสมดุลจำเพาะ (Speciation equilibrium) จากนั้นจะได้สารละลายอลูมิโนซิลิเกตอิมิตัวสูงที่อยู่ในรูปของเจล (Gelation) ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ในสภาวะที่มีน้ำเกิดการควบแน่นได้โครงสร้างขนาดใหญ่ ภายหลังจากการเกิดเจลระบยังคงดำเนินต่อ และจะทำการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ (Reorganization) เกิดโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกต 3 มิติ ซึ่งมีการเชื่อมโยงโครงข่ายและเกิดการควบแน่นแบบลูกโซ่ (Polymerization and hardening) ที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ โดยในกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ นั้นจะมีน้ำเกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งส่งผลดีต่อการทำงานได้ง่ายขึ้น

2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials)

(ASTM-C618, 2015) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ไว้ว่า “วัสดุปอซโซลาน” เป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดสูงและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ในประเทศไทยมีวัสดุปอซโซลานจำนวนมากและสามารถนำมาใช้ได้ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เถ้าดินขาวเผา เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น (Punlert & Laoratanakul, 2013)

2.4 สารละลาย (Solution)

2.4.1 สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์

อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์มีหน้าที่ชะละลาย เปลี่ยนวัสดุที่มีสารประกอบของอะลูมินาและซิลิเกตให้เป็นสารสังเคราะห์อัลคาไลน์อะลูมิเนต และซิลิเกต ปลดปล่อยออกเป็นอิสระอยู่ในรูปของสารโมโนเมอร์ อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็นด่างสูงแล้วใช้ได้ดี โดยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากราคาไม่สูงนัก หาได้ง่าย และให้จีโอโพลิเมอร์คุณภาพดี โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้กันมีความเข้มข้นค่อนข้างสูง ประมาณ 5 – 15 โมลาร์ (สุวรรณค์, 2515)

2.4.2 สารประกอบซิลิเกต

สารประกอบซิลิเกตที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate, Na_2SiO_3) ซึ่งมีหลายประเภท ถ้าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ สูงจะให้กำลังรับแรงดี แต่ความสามารถในการทำงานได้จะต่ำ โดยจะต้องใส่น้ำเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงาน

ได้ ตัวอย่างสารโซเดียมซิลิเกตที่มีในท้องตลาดประกอบด้วย Na_2O ร้อยละ 15, SiO_2 ร้อยละ 33 และน้ำ ร้อยละ 52 (ท่านจิตสุวรรณ์, ภูเงินขำ, & จินดาประเสริฐ, 2013)

2.5 เถ้าชานอ้อย

ในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยจำนวนทั้งหมด 109.857 ล้านตัน (สถิติ การเกษตรของประเทศไทย, 2559) นำเข้าสู่โรงงานน้ำตาลเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาล ซึ่ง โรงงานน้ำตาลดำเนินการรีดเอาน้ำหวานจากลำต้นของอ้อยจนหมด จะเหลือชานอ้อยและใบ ซึ่ง โรงงานน้ำตาลจะนำชานอ้อยและใบเหล่านี้กลับมาหมวนเวียนเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงพลังงานในการผลิต ความร้อนเพื่อใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจากการเผาชานอ้อยและใบจะทำให้เกิดเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) ซึ่งนับว่าเป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งในปี 2559 จะมีปริมาณ ของชานอ้อยและใบจำนวนทั้งสิ้น 31.181 ล้านตัน และทำให้มีเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) จำนวน ทั้งสิ้น 4.18 ล้านตัน การนำเถ้าชานอ้อยไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ย เพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม แต่ส่วนใหญ่ให้นำเถ้าชานอ้อยไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์

ลักษณะทางกายภาพสังเกตด้วยเครื่องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่มีกำลังขยายสูง พบว่าเถ้าชานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดย มีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอน (Puttala, Ongwande, Homwutthiwong, & Homwuttiwong, 2022) เมื่อบดเถ้าชานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับ เถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากผ่านการบดทั่วไป สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย พบว่าเถ้าชานอ้อยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด อยู่ใน ช่วงร้อยละ 65 - 75 มีปริมาณ SO_3 ต่ำ แต่มีปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20 - 30 การที่ LOI ของเถ้าชานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป ดังตารางที่ 1

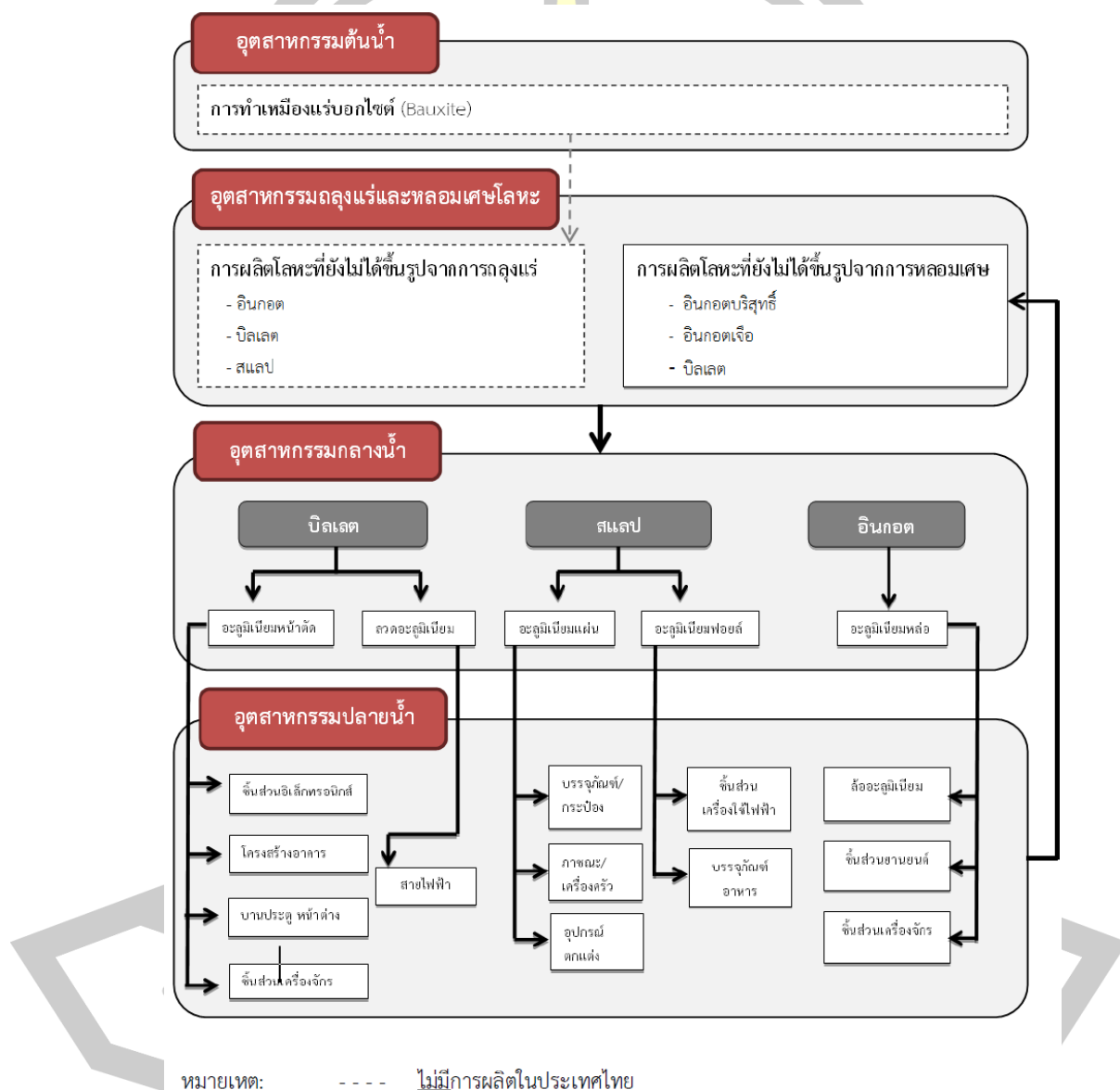
ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าชานอ้อย LOI สูง	เถ้าชานอ้อย LOI ต่ำ
SiO_2	76.80	67.10
Al_2O_3	4.40	5.69
Fe_2O_3	8.04	2.54
CaO	5.44	2.93
MgO	0.94	0.45
SO_3	0.09	0.03
LOI	3.28	20.36

(ที่มา : (จาดุรพิทักษ์กุล et al., 2013)

2.6 ปริมาณการใช้อะลูมิเนียมในประเทศไทย

ในประเทศไทยเริ่มต้นโครงสร้างอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมจากอุตสาหกรรมหลอมเศษอะลูมิเนียม เพื่อผลิตเป็นอะลูมิเนียมที่ยังไม่ขึ้นรูป (Unwrought) แล้วส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมขั้นกลางน้ำ โดยแบ่งโครงสร้างอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมไทยเป็น 6 กลุ่ม ดังภาพประกอบ 2 ประกอบด้วย



หมายเหตุ: - - - - ไม่มีการผลิตในประเทศไทย
 ————— มีการผลิตในประเทศไทย

ภาพประกอบ 2 กระบวนการผลิตอะลูมิเนียม

(ที่มา : (เหรียญนามวงศ์ & รักการ, 2022)

2.6.1 อุตสาหกรรมหลอมเศษอะลูมิเนียม

อุตสาหกรรมหลอมเศษอะลูมิเนียม คือ อุตสาหกรรมการนำเศษอะลูมิเนียมที่หมุนเวียนอยู่ในตลาด กลับมาหลอมใหม่โดยมีแหล่งที่มาทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โครงการก่อสร้าง รวมถึงจากรถเรื่อที่มีการใช้อลูมิเนียมกันอย่างแพร่หลาย ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหลอมเศษอะลูมิเนียม แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มโรงงานผู้ผลิตก้อนอะลูมิเนียมอัลลอย (Secondary alloy ingot) และกลุ่มโรงงานขึ้นรูปอะลูมิเนียมที่มีเตาหลอมเศษโลหะสำหรับหมุนเวียนเศษอะลูมิเนียมภายในโรงงาน สำหรับผู้ประกอบการกลุ่มโรงงานผู้ผลิตก้อนอะลูมิเนียมอัลลอย มีจำนวน 11 ราย กำลังการผลิตรวม 4.5 แสนตันต่อปี โดยในปี พ.ศ. 2556 มีปริมาณการผลิตรวมกับรายย่อย ๆ ในประเทศ 372,000 ตัน ด้วยอัตราการใช้กำลังการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 75% ผลิตภัณฑ์ก้อนอะลูมิเนียมอัลลอย ร้อยละ 87 ส่งป้อนให้กับอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมชิ้นกลางในประเทศ

2.6.2 อุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมในประเทศไทย

อุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมแบ่งตามกระบวนการผลิตได้ 2 กลุ่ม ประกอบด้วยกลุ่มที่ 1 อุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมแบบใช้แรงดันต่ำหรือแรงโน้มถ่วง (Low Pressure gravitation casting) และกลุ่มที่ 2 อุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมแบบใช้แรงดันสูง (High Pressure die-casting) กลุ่มอุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมแบบใช้แรงดันต่ำหรือแรงโน้มถ่วง มีผู้ประกอบการรายใหญ่ 6 ราย ส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมผลิตล้อแม็กซ์ ประมาณการว่ามีกำลังการผลิตถึง 144,000 ตันต่อปี กลุ่มอุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมแบบใช้แรงดันสูง มีผู้ประกอบการรายใหญ่ 6 ราย เป็นการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความละเอียด (Intricate) ที่มีขนาดเล็ก เช่น แผ่นบันไดเลื่อน ฝาสูบ ห้องเกียร์ เป็นต้น รวมถึงการผลิตโครงสร้างดีดสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิส โดยพบว่ามีการใช้อะลูมิเนียมประมาณ 480,000 ตันต่อปี และมีการนำเข้าจากต่างประเทศ ถึงประมาณ 70%

2.6.3 อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมหน้าตัด

อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมหน้าตัดสามารถแบ่งตามขนาดของผู้ผลิตได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ผู้ผลิตขนาดใหญ่ เป็นกลุ่มผู้ผลิตอะลูมิเนียมหน้าตัดคุณภาพดี ใช้ประกอบโครงสร้างขนาดใหญ่ ผู้ผลิตขนาดกลาง และผู้ผลิตขนาดเล็ก เป็นผู้ผลิตอะลูมิเนียมรายที่ผลิตฉาก กรอบ มุ้งลวด สำหรับบ้านเรือนทั่วไป โดยมีผู้ประกอบการรายใหญ่รวม 16 ราย มีการผลิตอะลูมิเนียมหน้าตัด รวมถึง 242,000 ตันต่อปี

2.6.4 อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมแผ่นและฟอยล์

โดยอะลูมิเนียมแผ่น (Sheet) มีความหนา 0.2 – 5 มม. ใช้ในอุตสาหกรรมขนส่ง อุตสาหกรรมก่อสร้าง รวมถึงอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ส่วนอะลูมิเนียมฟอยล์ (Foil) ความหนา

น้อยกว่า 0.2 มม. ใช้ในโรงงานผลิตเครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น ฝาจุกอะลูมิเนียม ภาชนะและบรรจุภัณฑ์ มีผู้ประกอบการ 5 ราย มีการผลิตอะลูมิเนียมแผ่นและฟอยล์รวม 156,000 ตันต่อปี

2.6.5 อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียม

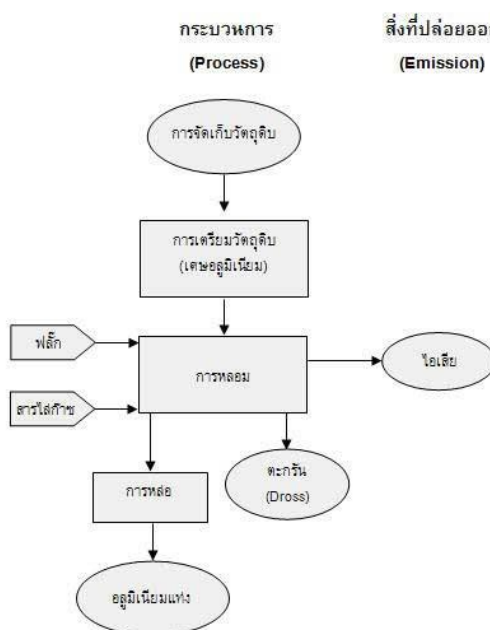
แบ่งรูปแบบของผลิตภัณฑ์ออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ฝา บรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียม ครอบอะลูมิเนียม และภาชนะอะลูมิเนียม โดยมีผู้ประกอบการที่ผลิตบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมรายใหญ่ จำนวน 7 ราย

2.6.6 อุตสาหกรรมสายไฟอะลูมิเนียม

สายไฟอะลูมิเนียมในประเทศไทยมีผู้ใช้งานหลักส่วนใหญ่เป็นหน่วยงานภาครัฐ ทั้งการไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้สำหรับใช้ส่งไฟฟ้าแรงดันสูงกระจายไปทั่วประเทศ โดยส่วนใหญ่จะใช้อะลูมิเนียมเกรด EC 1350 ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.7% ขึ้นไป

ประเทศไทยมีความต้องการใช้งานอะลูมิเนียม (Total demand) ในปี พ.ศ. 2556 ปริมาณรวมทั้งสิ้น 1,051,515 ตัน คำนวณจากปริมาณความต้องการใช้งานรวมในกลุ่มอะลูมิเนียมที่ยังไม่ขึ้นรูป (Unwrought) จำนวน 880,190 ตัน รวมกับการนำเข้าสุทธิของอุตสาหกรรมกลางน้ำและปลายน้ำ โดยประเทศไทยเป็นประเทศผู้นำเข้า โดยมีการนำเข้าก้อนอะลูมิเนียมที่ยังไม่ได้ขึ้นรูปจากการถลุงแร่ (Primary ingot) ในปี พ.ศ. 2556 ปริมาณสูงถึง 558,136 ตัน โดยนำเข้าสูงสุด 5 อันดับแรกจากประเทศออสเตรเลีย สหรัฐอาหรับเอมิเรต กาตาร์ และมาเลเซีย อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมหน้าตัด มีการส่งออกสุทธิ 48,110 ตัน อุตสาหกรรมแผ่นและฟอยล์ มีการนำเข้าสุทธิ 238,754 ตัน อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียม มีการนำเข้าสุทธิ 2,981 ตัน อุตสาหกรรมสายไฟอะลูมิเนียม มีการนำเข้าสุทธิ 2,479 ตัน และอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมหมวดอื่นๆ มีการส่งออกสุทธิ 24,779 ตัน รายงานฉบับสมบูรณ์ การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals): อะลูมิเนียม ภายใต้โครงการพัฒนาศูนย์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหะการประจำปีงบประมาณ 2557 (Greaves, 2018) แนวโน้มการใช้งานอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมไทย จากการค้าการณั้อัตราการเติบโตของอุตสาหกรรมต่อเนื่องของประเทศไทยใน 3 กลุ่มหลักที่มีการใช้งานอะลูมิเนียมสูงสุด โดยมีการคาดการณ์ถึงปี พ.ศ. 2563 พบว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างคาดว่าจะมีการขยายตัวเฉลี่ยในอัตราร้อยละ 4 ต่อปี จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย ทั้งการก่อสร้างบ้าน คอนโดมิเนียม โรงงาน รวมถึงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ของภาครัฐ อุตสาหกรรมยานยนต์คาดว่าจะมีการขยายตัวเฉลี่ยในอัตราร้อยละ 11 – 12 ต่อปีจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2557 คณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) ได้มีการอนุมัติส่งเสริมกิจการผลิตรถยนต์ประหยัดพลังงานมาตรฐานสากล ระยะที่ 2 (Eco-car

phase 2) ส่งผลให้แนวโน้มความต้องการใช้งานอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมยานยนต์ยังคงมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องจากมาตรการดังกล่าว อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์คาดว่าจะมีการขยายตัวเฉลี่ยในอัตราร้อยละ 7 - 11 ต่อปี จากการศึกษาที่ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์โดยมีการผลิตจำหน่ายทั้งในประเทศและส่งขายไปยังประเทศต่าง ๆ โดยเฉพาะประเทศในกลุ่มอาเซียนโดยดำเนินการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติธาตุโลหะองค์ประกอบ และความเป็นอันตรายเบื้องต้นด้วยเครื่องมือภาคสนาม ตามภาพประกอบ 3 ดังนี้



ภาพประกอบ 3 กระบวนการหลอมหล่อตะกอนอะลูมิเนียมและสิ่งปล่อยออกจากกระบวนการ (Greaves, 2018)

1) การตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติและความเป็นอันตราย

เบื้องต้นด้วยชุดทดสอบ ภาคสนาม (Hazcat kit) พบว่ากากของเสียมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา มีคุณสมบัติละลายน้ำได้เล็กน้อย และส่วนของสารที่ไม่ละลายน้ำจะมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ (จมน้ำ) pH ~ 10

2) การตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนีย

โดยการนำตัวอย่างกากของเสียไปละลายน้ำในอัตราส่วน 1 : 1 และทำการตรวจวัดไอระเหยด้วยหลอดวัดไอระเหยสารเคมี (Gas detector tube) ปรากฏว่าตรวจพบก๊าซแอมโมเนียมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 100 ppm

- 3) การตรวจวัดกากของเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ชนิดสารเคมี (hazMet ID) พบว่าของเสียดังกล่าวมีองค์ประกอบของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)
- 4) การตรวจวัดโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ การตรวจวัดโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ชนิดพกพา (XRF) รุ่น Innov – systems deltax dynamic ผลปรากฏว่าตรวจพบโลหะหนัก ได้แก่ อะลูมิเนียม สังกะสี โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว ทองแดง ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเสียอะลูมิเนียมหรือตะกรัน

ตัวอย่าง กากของ เสีย	โลหะหนัก (ppm)							
	อะลูมิเนียม (AL)	โครเมียม (Cr)	นิกเกิล (Ni)	สังกะสี (Zn)	เหล็ก (Fe)	แมงกานีส (Mn)	ตะกั่ว (Pb)	ทองแดง (Cu)
ผงสีเทา ละเอียด	147,100	6,000	13,600	143,000	215,600	13,600	42,100	239,000

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(ทองออน & ชีระโรจน์, 2019) ได้ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยโดยการนำมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ค้างบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 0 – 12 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ล้วนร้อยละ 13 และมีดัชนีความเป็นปอซโซลานที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ 102 ถึง 108 ของมอร์ตาร์ควบคุม การศึกษาคุณสมบัติทางด้านความคงทนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยของ

(สุรวงศ์, 2515) พบว่าสามารถใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ได้มากถึงร้อยละ 30 โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และนอกจากเรื่องของกำลังคอนกรีตแล้วยังพบว่าคอนกรีตที่แทนด้วยเถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติต้านทานกรดซัลฟูริกและการต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต แต่พบอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มให้ค่าการหดตัวสูงขึ้น และอาจหวังการก่อตัวของคอนกรีตได้อย่างมากหากเถ้าชานอ้อยยังมีน้ำตาลหลงเหลืออยู่

(ห่านจิตสุวรรณ์, et al., 2013) ทำการศึกษาคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยไม่โครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ เพื่อหาความชื้นเหลือปกติเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพลสและ กำลังรับแรงอัด โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 0 10 20 และ 30 รวมทั้งไม่โครซิลิการ้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และเติมสารลดน้ำพิเศษต่อวัสดุประสานร้อยละ 0 1 2 3 และ 4

โดยน้ำหนัก เพื่อควบคุมอัตราการไหลแฝงที่ร้อยละ 110 ± 5 จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 3 การผสมเถ้าลอยจะทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการผสมไมโครซิลิกาทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ทั้งนี้มาจากสาเหตุที่วัสดุมีความละเอียดที่สูงขึ้น สำหรับด้านกำลังรับแรงอัดช่วงต้นมีค่าลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นในภายหลัง ส่วนการผสมไมโครซิลิกาจะทำให้กำลังรับแรงอัดทั้งระยะต้นและระยะปลายดีขึ้น

(Askarian, Tao, Adam, & Samali, 2018) ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์แบบผสมผสาน โดยส่วนหนึ่งใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 7.5 ของสารตั้งต้น เป็นตัวกระตุ้นหลัก ทำการทดสอบ ความสามารถในการทำงาน ระยะเวลาในการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมคอนกรีต พบว่าการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจีโอโพลิเมอร์ลดความสามารถในการทำงานและระยะเวลาในการก่อตัว แต่เพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงสุดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันมีค่า 26.7 เมกะปาสคาล เป็นกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มีค่า 33.4 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังได้ทดสอบส่วนผสมคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าร้อยละของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นที่คอนกรีตอายุ 28 วัน เนื่องจากการกระตุ้นจากสารละลายอัลคาไลน์ลดลงจากร้อยละ 82.5 เป็นร้อยละ 24.4 ตามผลของการเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 60

(Amin, Alam, & Gul, 2016) ศึกษาส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์บางส่วนหรือทั้งหมด โดยปรับอัตราปริมาณวัสดุตั้งต้น อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้นและอัตราส่วนการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ พบว่ากำลังรับแรงอัดในทุกส่วนผสมมีค่าสูงสุดโดยการแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 50 ในด้านปริมาณวัสดุตั้งต้นแบ่งออกเป็น 2 อัตราส่วนคือ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุตั้งต้นกำลังรับแรงอัดอาจจะไม่ได้สูงขึ้นเสมอไป เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนสารละลาย 0.55 และ ปริมาณ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรอัตราส่วนสารละลาย 0.45 พบว่ากำลังแรงอัดของอัตราส่วนที่มีปริมาณวัสดุตั้งต้นน้อยมีค่าต่ำกว่าในการแทนที่ร้อยละ 0 แต่เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยกลับพบว่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณวัสดุตั้งต้นมากในทุกช่วงของการแทนที่ อาจสรุปได้ว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น 0.55 อย่างมีนัยสำคัญ

(Mejia, Rodríguez, de Gutiérrez, & Gallego, 2015) ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถ

แข็งตัวในอุณหภูมิปกติได้ เนื่องจากการศึกษาส่วนมากเน้นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ต้องผ่านการบ่มร้อนในการพัฒนากำลังรับแรงอัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์เพื่อเร่งการบ่ม จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแทนการใช้ความร้อน โดยเก็บไว้ในห้อง (อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส) จนกระทั่งถึงอายุคอนกรีตที่ทำการทดสอบ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 5 ของวัสดุตั้งต้น ช่วยลดระยะเวลาในการก่อตัวลงแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และลดความสามารถในการทำงานลงเล็กน้อย แต่กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุคอนกรีตที่ 28 วัน โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์พบว่ามีปริมาณแคลเซียมที่เติมไปด้วย Aluminosilicate Gel ซึ่งเกิดจากการเติม OPC

(Pangdaeng, Phoo-ngernkham, Sata, & Chindaprasirt, 2014) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเติมแต่งที่มีการบ่มแตกต่างกัน โดยที่เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น โดยศึกษาถึงเวลาและโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ การไหลแม่ กำลังรับแรงอัด ความพรุนและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ วิธีการบ่มได้แบ่งออกเป็น วิธีการบ่มแบบไอน้ำและการบ่มอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมช่วยเพิ่มสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวเนื่องจากการก่อตัวของ CSH และ CASH เจล วิธีการบ่มยังมีผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมีนัยสำคัญ การบ่มด้วยไอน้ำช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและทำให้มีกำลังอัดสูงส่วนการบ่มด้วยอุณหภูมิทำให้การรับแรงอัดเริ่มต้นสูง ในด้านความสามารถในการทำงานได้พบว่าทุกส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ร้อยละ 111-136) แต่ในด้านระยะก่อตัวมีเพียงการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐานโดยมีค่าระยะเวลาก่อตัวต้น 66 นาที และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย 82 นาที

(Tanyildizi & Coskun, 2008) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าลอย โดยการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และนำไปบ่มในน้ำที่กำหนดอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่อายุ 28 วัน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างออกมาพักไว้ให้อุณหภูมิคงที่ และนำไปจัดเก็บบริเวณห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ จากผลการทดสอบพบว่า เถ้าลอยช่วยป้องกันการลดลงของกำลังรับแรงอัดและกำลัง

รับแรงดึง เนื่องจากอุณหภูมิสูงได้ โดยปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและอุณหภูมิที่เหมาะสมคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Singh N.B. (2000) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อย พบว่า เถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยการแทนที่เถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10 สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดี แต่จะลดลงเมื่อการแทนที่มากขึ้น การขยายตัวต่ำ และต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้ดี

อริกา วงศ์วานกลม (2553) ได้ทำการศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อย และตะกอนน้ำประปาเป็นวัสดุตั้งต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 และ 20 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนของ $Na_2SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 0.50 – 1.50 โดยน้ำหนัก พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยเพียงชนิดเดียว และกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการบ่ม ความร้อนในช่วงอายุต้น นอกจากนี้ยังพบว่า การขยายตัวและการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์

(Chusilp, Jaturapitakkul, & Kiattikomol, 2009; Rukzon & Chindaprasirt, 2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำเถ้าชานอ้อยมาผสมในคอนกรีตกำลังสูง โดยนำเถ้าชานอ้อยมาอบและบดให้ละเอียดจนกระทั่งค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ดีและความพรุนต่ำ

(Chusilp, et al., 2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต โดยนำเถ้าชานอ้อยมาอบและบดให้ละเอียดจนกระทั่งค้ำตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน ผลพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก สามารถรวมกำลังแรงอัด

ได้มากกว่าคอนกรีตควบคุม โดยปริมาณที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่ปริมาณร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 113 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

เจริญชัย ฤทธิรุทธ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2550) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผาระนอง โดยศึกษาจากผลของกำลังรับแรงอัดต่อตัวแปรต่างๆ พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 600 องศาเซลเซียส และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ให้กำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ KOH เพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ เท่ากับ 1.33 บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อใช้ความเข้มข้นของ KOH เท่ากับ 15 โมลาร์ จะทำให้การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นเร็วมาก จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะไม่มีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดเมื่ออายุมากขึ้น

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2548) ได้ศึกษาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ การพัฒนา กำลังอัดและการเกิดความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย ที่มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผาต่ำและสูง โดยนำเถ้าขานอ้อยมาอบและบดให้ละเอียดจนกระทั่งค้ำงตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.50 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่าการยุบตัว จากการศึกษาพบว่า ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อย ที่มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผาต่ำ มีเวลาการก่อตัวแปรผันตามร้อยละการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

ณัฐพล เกตุโกมล (2549) ได้ศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย โดยการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและแยกความละเอียดของเถ้าขานอ้อยออกเป็น 3 กลุ่ม ชนิด C-BA เป็นเถ้าขานอ้อยร้อนตะแกรงเบอร์ 50 ชนิด M-BA เป็นเถ้าขานอ้อยร้อนตะแกรงเบอร์ 100 ชนิด F-BA เป็นเถ้าขานอ้อยร้อนตะแกรงเบอร์ 200 จากผลการทดลองพบว่า เถ้าขานอ้อยชนิด F-BA ที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 88 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งผ่านเกณฑ์ ASTM C 618 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย จะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นเมื่อบดเถ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดมากขึ้น

รัฐพล สมณา และคณะ (2552) ได้ศึกษาผลของการใช้เถ้าลอยบดละเอียดในคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนมวลรวมหยาบธรรมชาติต่อการซึมผ่านของน้ำ และกำลังรับแรงอัด มวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในการทดสอบกำลังอัดที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 250 ถึง 450 กก./ชม.2 หล่อคอนกรีตควบคุมโดยมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 450 กก./ชม.2 ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าลอยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถช่วยให้คอนกรีตจากการย่อยเศษคอนกรีตพัฒนากำลังอัด จนมีค่าเท่ากับร้อยละ 98 ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 90 วัน และสามารถใช้อุณหภูมิสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยค่ากำลังอัดที่ได้ยังคงมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยในส่วนผสม

วิเชียร ชาลี และคณะ (2549) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าลอย 3 แหล่ง ต่อการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล โดยหล่อคอนกรีตควบคุมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำหนด W/B เท่ากับ 0.65 และนำเถ้าลอยจาก 3 แหล่งแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้แก่ เถ้าลอยบดละเอียดจากภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และเถ้าลอยจากภาคเหนือ โดยนำเถ้าลอยที่ได้มาแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร สูง 0.20 เมตร และบ่มคอนกรีตในน้ำที่อายุ 28 วัน และนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นน้ำทะเล ที่อายุ 3 ปี ก่อนนำตัวอย่างมาทำการทดสอบ ผลการวิจัยพบว่าการใช้เถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่ง ให้ผลในการต้านทานการทาลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่เป็นน้ำทะเล โดยการใช้เถ้าลอยจากภาคเหนือให้ผลในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าภาคตะวันออกและภาคตะวันตก

(Duxson, Mallicoat, Lukey, Kriven, & Van Deventer, 2007) ทำการศึกษาผลของสารอัลคาไลน์และอัตราส่วน Si/Al ที่มีผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากดินขาวเผา โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอัลคาไลน์ (โซเดียมและโพแทสเซียม) และอัตราส่วน Si/Al ที่มีผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยพบว่า มีผลต่อกำลังรับแรงอัดน้อยมาก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ Si/Al พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อผสมอัลคาไลน์ชนิดเดียวพบว่าตัวอย่างมีกำลังลดลง การพัฒนาของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์ระหว่างอายุ 7 และ 28 วัน ขึ้นอยู่กับสารอัลคาไลน์ ซึ่งค่าโมดูลัส

ยัดหุ่่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในตัวอย่างของ Na ที่อัตราส่วน Si/Al ต่ำ แต่จะลดลงเมื่ออัตราส่วน Si/Al เพิ่มขึ้น ขณะที่ตัวอย่างของ K ได้ผลตรงกันข้ามกับ Na และอัตราส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงสารอัลคาไลน์ ทั้ง 2 ชนิดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสยัดหุ่่นน้อยมาก ถือได้ว่า อัตราส่วน Si/Al ไม่นัยสำคัญต่อค่าโมดูลัสยัดหุ่่นของจีโอโพลิเมอร์

(Onutai, et al., 2015) จีโอโพลิเมอร์จากสารตั้งต้นเถ้าลอยผสมกากของเสียอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สำหรับการพัฒนาวัสดุซีเมนต์อย่างยั่งยืน นำของเสียอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และเถ้าลอย (เอฟเอ) ทั้งสองทำการผสมปริมาณกากของเสียอะลูมิเนียมที่แตกต่างกันของ 10 – 60% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนมวลของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เพื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) คงที่ 2.5 ที่นี้ ความเข้มข้นของ NaOH 5, 10 และ 15 โมลาร์ท ถูกนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์เพื่อให้เกิดกระบวนการเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่(พอลิเมอร์) การประเมินผลคุณสมบัติของเจลโพลิเมอร์โดยใช้การวัดสมบัติหุ่่นหนืด ซึ่งการศึกษาพบว่าสารละลายที่มีส่วนผสมของอลูมินาที่สูงขึ้นมีโมดูลัสยัดหุ่่นที่สูงขึ้นและการตั้งค้เวลาที่ม้ค่ามากกว่าที่ FA ที่ไม่มีวัสดุอื่นเจือปน จากนั้นก็ปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาหนึ่งสัปดาห์และเหลือไว้ในเตาอบที่ 60 องศาเซลเซียสและ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กระบวนการเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่หรือ(พอลิเมอร์) เพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของ NaOH เพิ่มขึ้นหลังจากบ่ม สมบัติเชิงกล โครงสร้างขนาดเล็ก การยัดเกาะ และกระบวนการค้นหาผลลัพธ์ของ geopolymers ปริมาณของ Al – Waste ในจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของ NaOH การบ่มที่เปลี่ยนอุณหภูมิแตกต่างกัน ปริมาณของ Al – Waste ที่ 40% ในจีโอโพลิเมอร์ โดยน้ำหนักบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสผลลัพธ์พบว่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 40 เมกะปาสคาลและยังมีความหนาแน่นสูงสุดประมาณ 2.8 กรัม/ซม. นอกจากนี้ X-ray สแกน CT ผลการวิจัยพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณของ Al – Waste ที่ 40% โดยน้ำหนักบ่มไว้ที่ 80 องศาเซลเซียสพบว่าโครงสร้างหนาแน่น

(Amin, Alam, et al., 2016) ได้วิเคราะห์ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อยผสมกับดินเหนียวจีน โดยนำดินเหนียวจีนเผาที่ 900 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เครื่อง XRF พบว่าดินเหนียวจีนเผาที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) เมื่อใช้ผสมกับเถ้าขานอ้อยโดยใช้สารละลาย Na_2SiO_3 และ NaOH โดยในงานวิจัยใช้อัตราส่วนผสมของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ 2.5, 3.0 และ 3.5 แรงอัดสูงสุดของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 2.5 กับอัตราส่วนทราย 1 : 1 ของจีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 1947 PSI

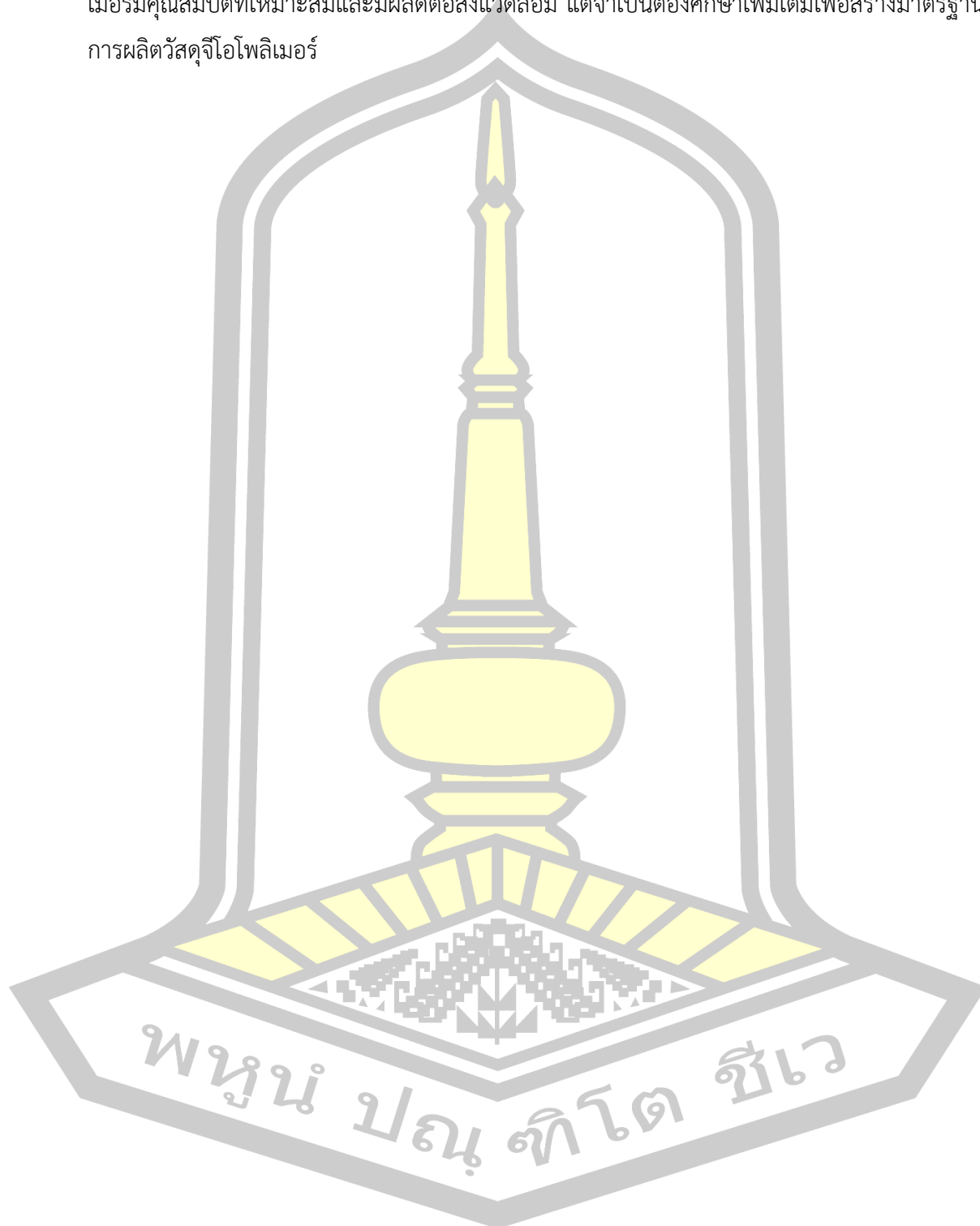
(Singh, Singh, & Rai, 2000) ได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าขานอ้อยผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาที่อายุ 1 7 15 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงและกำลังอัดจะมากกว่าคอนกรีตควบคุม

(Bakharev, 2005) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

(Hardjito, Wallah, Sumajouw, & Rangan, 2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.095 และ 0.120 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถ้าถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

(Hardjito, Wallah, Sumajouw, & Rangan, 2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัสดุดิบที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่า

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์



บทที่ 3

การดำเนินการศึกษา

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมโดยได้ดำเนินการศึกษาตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา
3. คำอธิบายสัญลักษณ์ในงานวิจัย
4. ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์
5. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา
6. ตัวแปรที่ทำการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 เถ้าชานอ้อย

เถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล นำมาเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ต้องนำเถ้าชานอ้อยมาทำการบดให้ละเอียดจนเหลือน้ำหนักอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 เพื่อลดความชื้นและให้เถ้าเป็นสีเทา

3.1.2 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมที่เหลือทิ้งจากงานก่อสร้างจากกระบวนการผลิตวงกบประตูหน้าต่าง อะลูมิเนียมซึ่งมีขนาดเล็กใหญ่ปะปนกัน ก่อนนำมาใช้งานต้องทำการล้างเศษฝุ่นด้วยน้ำออกจากเศษอะลูมิเนียม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้น หลังจากนั้นนำเศษอะลูมิเนียมไปแยกขนาดโดยการใช้ตะแกรงร่อน เพื่อคัดขนาดมาใช้ในงานวิจัย โดยจะเลือกเฉพาะขนาดของเศษอะลูมิเนียมที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 40

3.1.3 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการเตรียมการทดสอบและเตรียมสารละลาย คือ น้ำกลั่น

3.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 นำมาเตรียมที่ความเข้มข้น 7.5, 10, 12.5 และ 15 โมลาร์ โดยการเตรียมสารละลายก่อนการทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของ Na_2O ร้อยละ 15.32, SiO_2 ร้อยละ 32.87, H_2O ร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก

3.1.6 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดเป็นทรายหยาบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.60 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.74 โดยมีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

- 3.2.1 เครื่องบดแบบตกกระทบ
- 3.2.2 ตะแกรงร่อนเบอร์ 20 40 และ 325
- 3.2.3 เครื่องชั่งละเอียด 0.01 กรัม
- 3.2.4 บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.2.5 แท่งกวนสารละลาย
- 3.2.6 ขวดรูปชมพู่
- 3.2.7 เครื่องผสมมอร์ตาร์
- 3.2.8 แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร
- 3.2.9 เครื่องสั่น
- 3.2.10 แผ่นพลาสติก
- 3.2.11 ตู้อบ
- 3.2.12 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.3 คำอธิบายสัญลักษณ์ในงานวิจัย

คำอธิบายสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

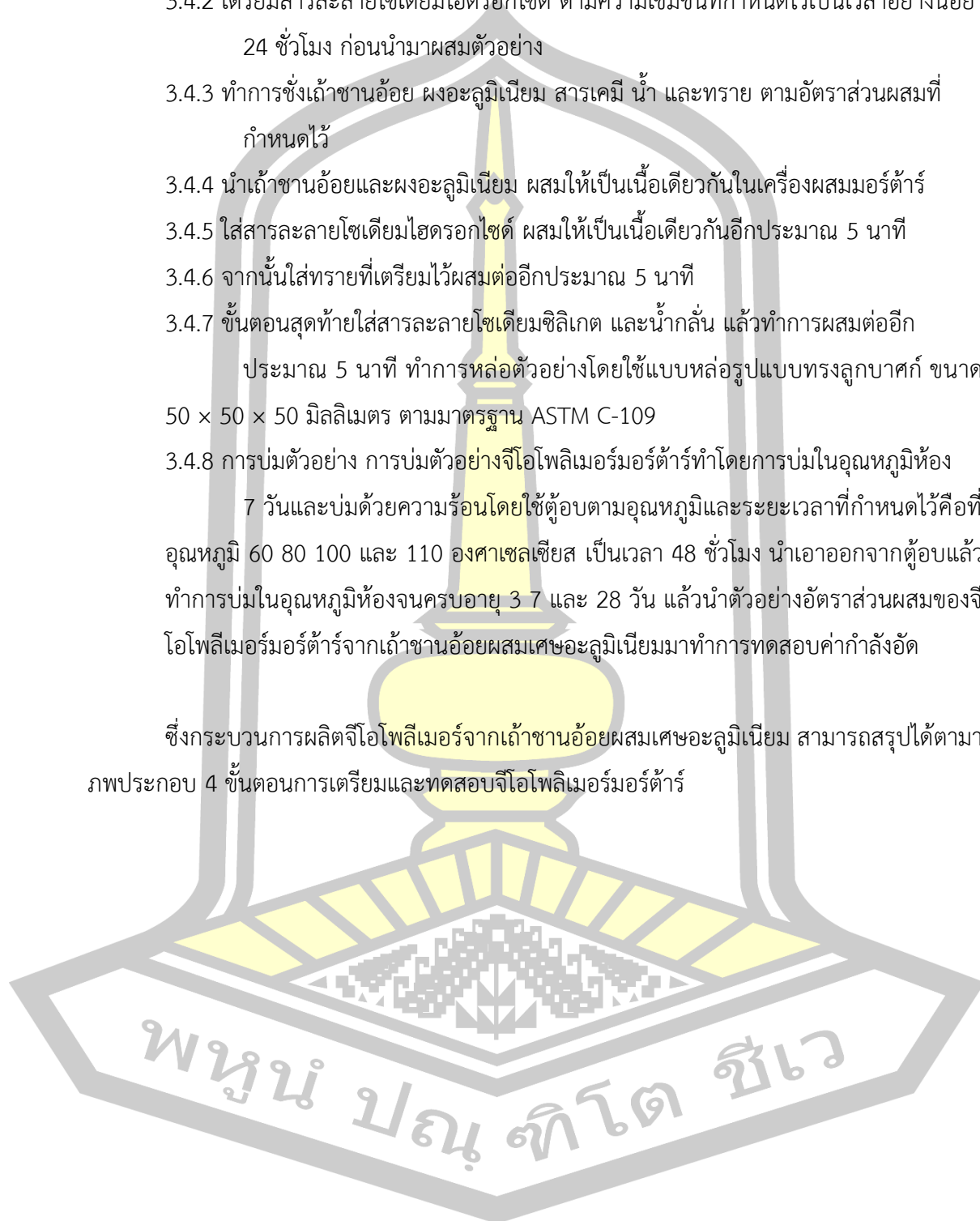
- AL หมายถึง เศษอะลูมิเนียมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 20 และ 40
- BA หมายถึง เถ้าขานอ้อยตั้งเดิมบดละเอียดค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5
- NH หมายถึง สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- NS หมายถึง สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)
- WC หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

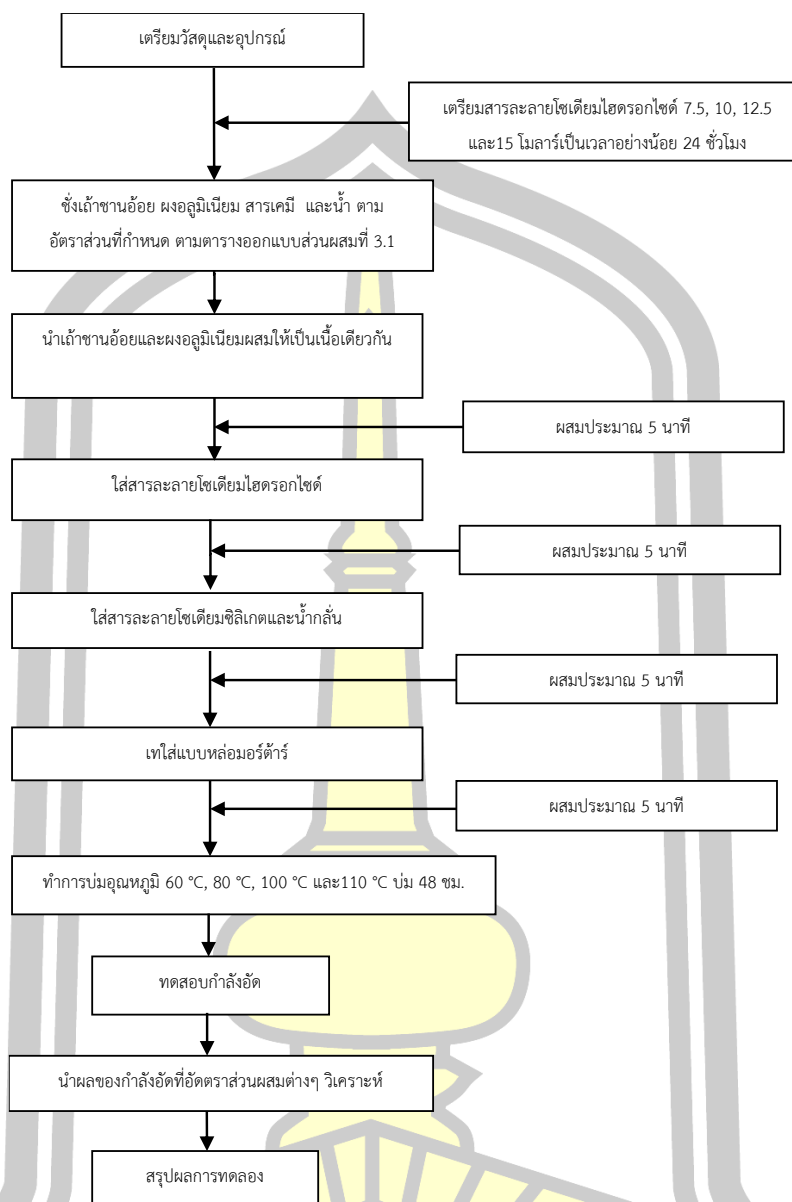
3.4 ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การเตรียมส่วนผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับการทดสอบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.4.1 จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการผสมจีโพลีเมอร์มอร์ตาร์
- 3.4.2 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาผสมตัวอย่าง
- 3.4.3 ทำการชั่งเถ้าซันอ้อย ผงอะลูมิเนียม สารเคมี น้ำ และทราย ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้
- 3.4.4 นำเถ้าซันอ้อยและผงอะลูมิเนียม ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในเครื่องผสมมอร์ตาร์
- 3.4.5 ใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันอีกประมาณ 5 นาที
- 3.4.6 จากนั้นใส่ทรายที่เตรียมไว้ผสมต่ออีกประมาณ 5 นาที
- 3.4.7 ขั้นตอนสุดท้ายใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำกลั่น แล้วทำการผสมต่ออีกประมาณ 5 นาที ทำการหล่อตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อรูปแบบทรงลูกบาศก์ ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C-109
- 3.4.8 การบ่มตัวอย่าง การบ่มตัวอย่างจีโพลีเมอร์มอร์ตาร์ทำการบ่มในอุณหภูมิห้อง 7 วันและบ่มด้วยความร้อนโดยใช้ตู้อบตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดไว้คือที่อุณหภูมิ 60 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำเอาออกจากตู้อบแล้วทำการบ่มในอุณหภูมิห้องจนครบอายุ 3 7 และ 28 วัน แล้วนำตัวอย่างอัตราส่วนผสมของจีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าซันอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมมาทำการทดสอบค่ากำลังอัด

ซึ่งกระบวนการผลิตจีโพลีเมอร์จากเถ้าซันอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม สามารถสรุปได้ตามภาพประกอบ 4 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบจีโพลีเมอร์มอร์ตาร์





ภาพประกอบ 4 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบจีไอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์

3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

- 3.5.1. ความเข้มข้นของสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ NH ที่ 7.5 10 12.5 และ 12.5
- 3.5.2. ปริมาณน้ำร้อยละ 5 6 7 และ 8 โดยน้ำหนักของถ้ำชานอ้อย
- 3.5.3. ปริมาณการเติมเศษอะลูมิเนียมในอัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 4 5 7 10 12.5 และ 15 ของน้ำหนักถ้ำชานอ้อย
- 3.5.4. อัตราส่วนของของสารละลายต่อวัสดุประสาน AL/BA เท่ากับ 0.5 และ 0.55
- 3.5.5. อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม 60 80 และ 110 องศาเซลเซียส

3.5.6. อัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต NH/NS ที่อัตราส่วน 50:50 45:55 40:60 และ 35:65 ซึ่งปริมาณอัตราส่วนไม่เกินสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น AL/BA เท่ากับ 0.5

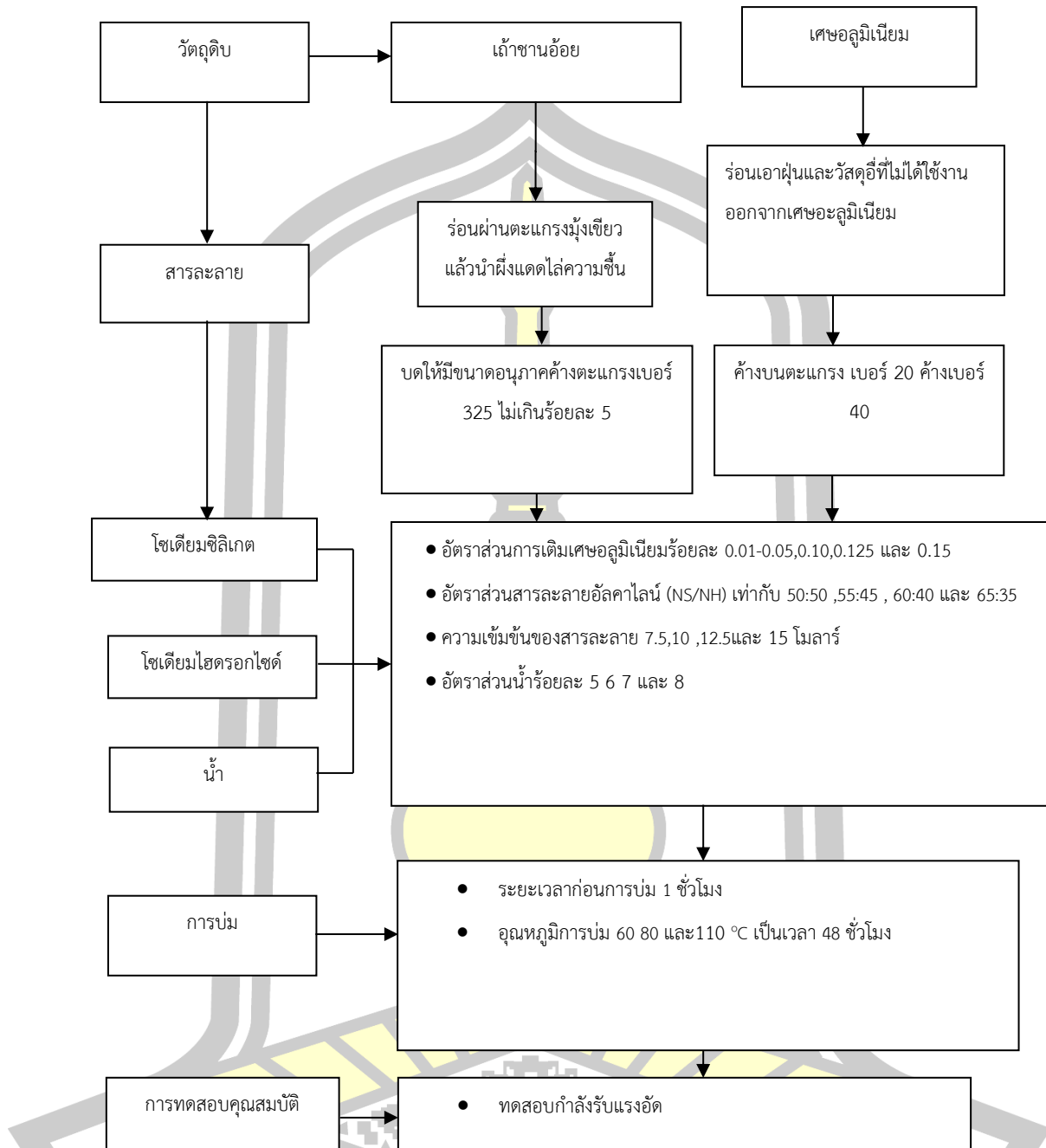
ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	NH (M)	Curing (°C)	Al (g)	BA (g)	Sand (g)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	%Water	Remark
1	10NHALu _{0.00}	10	60	-	700	1890	175	175	5	
2	7.5NHALu _{0.125}	7.5	60	87.5	700	1890	175	175	5	
3	10NHALu _{0.125}	10	60	87.5	700	1890	175	175	5	
4	12.5NHALu _{0.125}	12.5	60	87.5	700	1890	175	175	5	
5	15NHALu _{0.125}	15	60	87.5	700	1890	175	175	5	
6	7.5NHALu _{0.125}	7.5	60	87.5	700	1890	175	175	5	
7	10NHALu _{0.125}	12.5	60	87.5	700	1890	175	175	5	
8	12.5NHALu _{0.125}	12.5	60	87.5	700	1890	175	175	5	
9	12.5NHALu _{0.125}	1.25	60	87.5	700	1890	175	175	6	
10	12.5NHALu _{0.125}	1.25	60	87.5	700	1890	175	175	7	
11	12.5NHALu _{0.125}	1.25	60	87.5	700	1890	175	175	8	
12	15Alu _{0.125}	1.25	60	87.5	700	1890	175	175	6	
13	15NHALu _{0.125}	15	60	87.5	700	1890	175	175	7	
14	15NHALu _{0.125}	15	60	87.5	700	1890	175	175	8	
15	10NHALu _{0.00}	10	60	-	700	1890	175	175	5	
16	10NHALu _{0.01}	10	60	7	700	1890	175	175	5	
17	10NHALu _{0.02}	10	60	14	700	1890	175	175	5	
18	10NHALu _{0.03}	10	60	21	700	1890	175	175	5	
19	10NHALu _{0.04}	10	60	28	700	1890	175	175	5	
20	10NHALu _{0.05}	10	60	35	700	1890	175	175	5	
21	10NHALu _{0.10}	10	60	70	700	1890	175	175	5	
22	10NHALu _{0.125}	10	60	87.5	700	1890	175	175	5	
23	10NHALu _{0.150}	10	60	105	700	1890	175	175	5	
24	10NHALu _{0.00}	10	60	0	700	1890	175	175	5	0.50BA
25	10NHALu _{0.00}	10	60	0	700	1890	192.5	192.5	5	0.55BA
26	10NHALu _{0.10}	10	60	70	700	1890	175	175	5	0.50BA
27	10NHALu _{0.10}	10	60	70	700	1890	192.5	192.5	5	0.55BA
28	T60Alu _{0.00}	10	60	100	700	1890	175	175	5	0.50BA
29	T60Alu _{0.04}	10	60	-	700	1890	175	175	5	0.50BA
30	T80Alu _{0.04}	10	80	75	700	1890	175	175	5	0.50BA
31	T100Alu _{0.04}	10	100	50	700	1890	175	175	5	0.50BA
32	T110Alu _{0.04}	10	110	75	700	1890	175	175	5	0.50BA

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	NH (M)	Curing (°C)	Al (g)	BA (g)	Sand (g)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	%Water	Remark
33	50H50Slu0	10	80	0	700	1890	175	175	5	0.50BA
34	50/50Alu4	10	80	28	700	1890	175	175	5	0.50BA
35	55/45Alu4	10	80	28	700	1890	192.5	157.5	5	0.50BA
36	60/40Alu4	10	80	28	700	1890	210	140	5	0.50BA
37	65/35Alu4	10	80	28	700	1890	227.5	122.5	5	0.50BA
38	50/50Alu6	10	80	28	700	1890	175	175	5	0.50BA
39	55/45Alu6	10	80	28	700	1890	192.5	157.5	5	0.50BA
40	60/40Alu6	10	80	28	700	1890	210	140	5	0.50BA
41	65/35Alu6	10	80	28	700	1890	227.5	122.5	5	0.50BA
42	50/50Alu8	10	80	28	700	1890	175	175	5	0.50BA
43	55/45Alu8	10	80	28	700	1890	192.5	157.5	5	0.50BA
44	60/40Alu8	10	80	28	700	1890	210	140	5	0.50BA
45	65/35Alu8	10	80	28	700	1890	227.5	122.5	5	0.50BA
46	50H50Slu0	10	110	0	700	1890	175	175	5	0.50BA
47	50/50Alu4	10	110	28	700	1890	175	175	5	0.50BA
48	55/45Alu4	10	110	28	700	1890	192.5	157.5	5	0.50BA
49	60/40Alu4	10	110	28	700	1890	227.5	122.5	5	0.50BA
50	65/35Alu4	10	110	28	700	1890	175	175	5	0.50BA
51	50/50Alu6	10	110	28	700	1890	192.5	157.5	5	0.50BA
52	55/45Alu6	10	110	28	700	1890	210	140	5	0.50BA
53	60/40Alu6	10	110	28	700	1890	227.5	122.5	5	0.50BA
54	65/35Alu6	10	110	28	700	1890	175	175	5	0.50BA
55	50/50Alu8	10	110	28	700	1890	192.5	157.5	5	0.50BA
56	55/45Alu8	10	110	28	700	1890	210	140	5	0.50BA
57	60/40Alu8	10	110	28	700	1890	227.5	122.5	5	0.50BA
58	55/45Alu8	10	110	28	700	1890	175	175	5	0.50BA
59	60/40Alu8	10	110	28	700	1890	192.5	157.5	5	0.50BA
60	65/35Alu8	10	110	28	700	1890	227.5	122.5	5	0.50BA

โดย Alxxx คือ % ปริมาณผงอะลูมิเนียมในส่วนผสม, Xx/Yy คือ ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์/โซเดียมซิลิเกต



ภาพประกอบ 5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

พหุบัณฑิต โสวัต

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

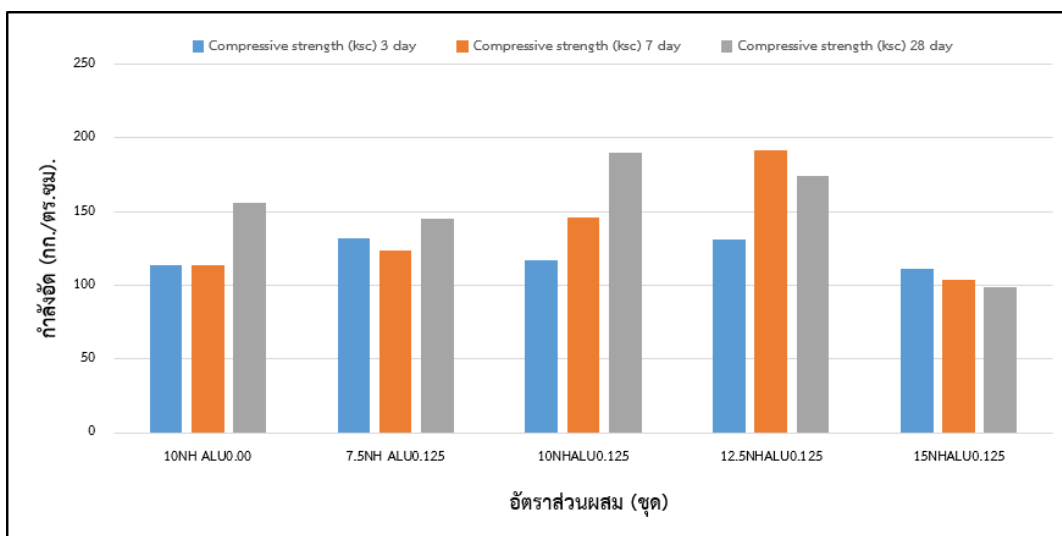
ผลการทดลองความละเอียดของเถ้าขานอ้อย และมวลรวมละเอียด โดยหลังจากที่นำวัสดุที่ผ่านวิธีการบดแบบตกระทบ เพื่อเพิ่มความละเอียดแล้วทำการทดสอบเถ้าขานอ้อยด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 พบว่ามีอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 เฉลี่ยร้อยละ 5 จากการทดสอบค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136-95 โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136-95 พบว่าทรายที่นำมาใช้ในการผสม จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.70

4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

4.2.1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ NH ที่เหมาะสมกับการพัฒนากำลังจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ตาราง 4 แสดงค่าการรับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อย ที่ความละเอียดค้างตะแกรง เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผสมเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณสัดส่วนที่กำหนด อัตราส่วนอัลคาลิท์ (AL/BA) ร้อยละ 0.5BA สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH = NH) ต่อ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃ = NS) 1 : 1 โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน และเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมกับเศษอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5 ผลของเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ NH ที่ 7.5 10 12.5 และ 15 ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

No.	Mixed proportion	NH / NS	Compressive strength (ksc)		
			3 days	7 days	28 days
1	10NH ALU _{0.00}	50/50	114	114	156
2	7.5NH ALU _{0.125}	50/50	132	124	145
3	10NHALU _{0.125}	50/50	117	146	190
4	12.5NHALU _{0.125}	50/50	131	192	174
5	15NHALU _{0.125}	50/50	111	104	99



ภาพประกอบ 6 แสดงกำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น NH NH ที่ 7.5 10 12.5 และ 15

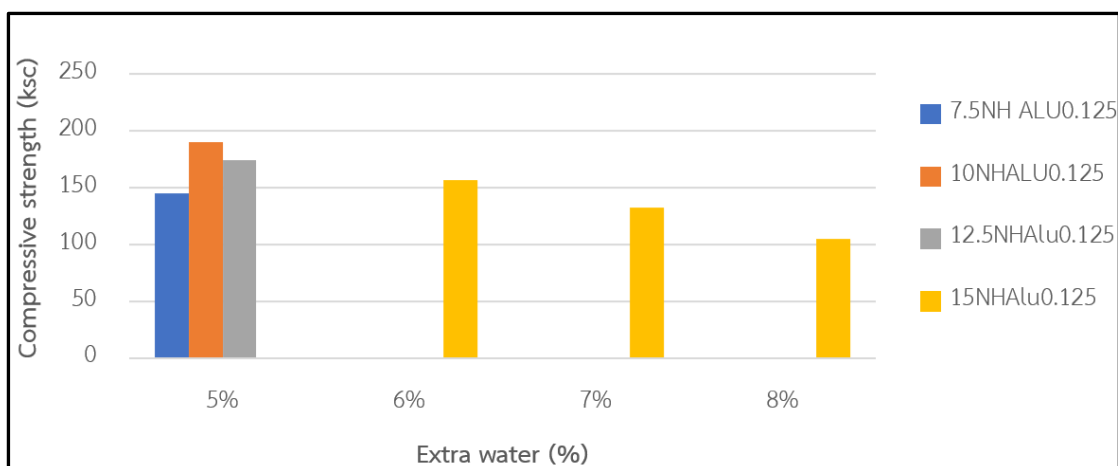
จากภาพประกอบ 6 แสดงของค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ 7.5 10 12.5 และ 15 โมลาร์ จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าความเข้มข้น NH = 10 M ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดของแท่งตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เถ้าชานอ้อยเป็นสารตั้งต้นของจีโอโพลีเมอร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ทำหน้าชะล้างอะลูมินาและซิลิกา ที่อยู่ในเถ้าชานอ้อย ซึ่งอะลูมินาในเถ้าชานอ้อยมีปริมาณที่น้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาอะลูมินาจากแหล่งวัสดุเศษอะลูมิเนียมที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งได้ใช้เศษอะลูมิเนียมจากงานผลิตประตู-หน้าต่างที่สามารถหาได้ในทุกพื้นที่ที่ ๆ มีการก่อสร้าง จากผลการนำตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนที่ออกแบบส่วนผสมตามตาราง 4 ไปทดสอบค่ากำลังอัดดังแสดงในภาพประกอบ 6 ผลปรากฏว่าตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์เถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมชุดที่ 3 ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) 10 M ให้ค่ากำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม สูงกว่าชุดอื่นๆ ซึ่งสังเกตว่าค่ากำลังอัดมีการพัฒนากำลังของจีโอโพลีเมอร์ ตามอายุของการบ่มมีแนวโน้มเป็นสมการเส้นตรง และเมื่อเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ ชุดที่ 4 ที่ใช้ความเข้มข้น 12.5 M ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 14 วันมีค่าเท่ากับ 192 ksc และเมื่ออายุครบ 28 วันค่ากำลังอัดดังกล่าวมีค่าลดลงมีค่าเท่ากับ 174 ksc มีค่ากำลังอัดแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งผลการวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ชรินทร์ เสนาวงษ์ คณะ, 2553) ผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่สูงมีความสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าชานอ้อยได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยา

พอลิคอนดีนเซชัน (Polycondensation) ได้สมบูรณ์ ส่งผลให้จีโอโพลีเมอร์มีกำลังสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่สูง แต่ค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ก็จะสูงด้วยเช่นกัน และระหว่างทำการทดสอบสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียม ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดมีก๊าซไฮโดรเจนกลั่นออกมา ดังนั้นแนวทางการศึกษาจะพิจารณาถึงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่เหมาะสมที่ทำให้มีความสามารถใช้งานได้ จากผลงานวิจัยที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) 7.5 10 12.5 และ 15 M ค่ากำลังอัดจีโอโพลีเมอร์จากเถาขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่อายุการบ่ม 28 วัน 145 190 174 และ 99 ตามลำดับ ดังนั้นแนวทางจึงพิจารณาเลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 M ในการเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถาขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

4.2.2 ปริมาณน้ำร้อยละ 5 6 7 และ 8 โดยน้ำหนักของเถาขานอ้อย ผลการศึกษาปัจจัยของการเติมน้ำ โดยใช้อัตราส่วนที่มีการเติมเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 7.5 10 12.5 และ 15 โดยทำการเติมน้ำร้อยละ 5 - 8 โดยน้ำหนักเถาขานอ้อย ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12.5 - 15 โมลาร์ จากรูปที่ 6 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12.5 โมลาร์ เติมน้ำร้อยละ 6 ลดความหนืดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ลงเล็กน้อยกำลังอัดที่อายุ 7 วัน แตกต่างกันเล็กน้อย และกำลังอัดลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ช่วงอายุต้นจะพบว่ากำลังอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงของการเติมน้ำร้อยละ 7 และในส่วนของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ พบว่าในช่วงอายุต้นและปลายกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามระดับของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำในการใช้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการพัฒนากำลังจีโอโพลีเมอร์จากเถาขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

No.	Mixed proportion	% น้ำในส่วนผสม	NH / NS	Compressive strength (ksc)		
				3 days	7 days	28 days
1	7.5NH ALU _{0.125}	5	50/50	132	124	145
2	10NHALU _{0.125}	5	50/50	117	146	190
3	12.5NHALU _{0.125}	5	50/50	131	192	174
4	12.5NHALU _{0.125}	6	50/50	NA	NA	NA
5	12.5NHALU _{0.125}	7	50/50	NA	NA	NA
6	12.5NHALU _{0.125}	8	50/50	NA	NA	NA
7	15NHALU _{0.125}	6	50/50	110	109	157
8	15NHALU _{0.125}	7	50/50	93	122	133
9	15NHALU _{0.125}	8	50/50	67	94	105



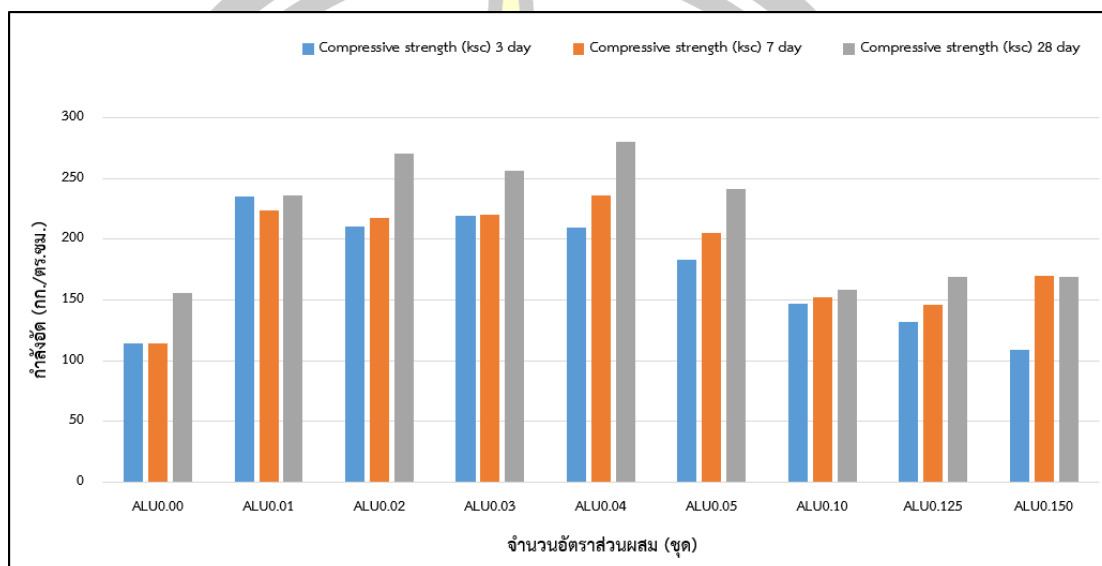
ภาพประกอบ 7 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้ปริมาณน้ำเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการพัฒนา กำลังจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

ตารางที่ 7 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอดาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่ปริมาณของเศษอะลูมิเนียมแตกต่างกัน

No.	Mixed proportion	NH / NS	Compressive strength (ksc)		
			3 day	7 day	28 day
1	ALU _{0.00}	50/50	113.95	113.95	155.98
2	ALU _{0.01}	50/50	235.04	223.50	236.09
3	ALU _{0.02}	50/50	210.30	217.97	270.31
4	ALU _{0.03}	50/50	219.48	220.09	256.54
5	ALU _{0.04}	50/50	209.49	236.39	280.02
6	ALU _{0.05}	50/50	183.39	205.43	241.37
7	ALU _{0.10}	50/50	147.07	152.70	158.26
8	ALU _{0.125}	50/50	131.57	146.32	168.80
9	ALU _{0.150}	50/50	109.24	169.88	169.07

4.2.3 ปริมาณการเติมเศษอะลูมิเนียมในอัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 4 5 7 10 12.5 และ 15 ของน้ำหนักเถ้าชานอ้อย ตารางที่ 6 แสดงค่าการรับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอดาร์จากเถ้าชานอ้อยที่ความละเอียดข้างตะแกรง เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผสมเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณที่แตกต่างกัน อัตราส่วน AL/BA ร้อยละ 0.5BA สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 1 : 1 และใช้ความร้อนเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์มอดาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมกับเศษอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสทุกๆ อัตราส่วนผสม จากนั้นทำการทดสอบเติมเศษอะลูมิเนียมแทนที่ในเถ้าชานอ้อยในปริมาณที่แตกต่างกัน ตามที่ได้

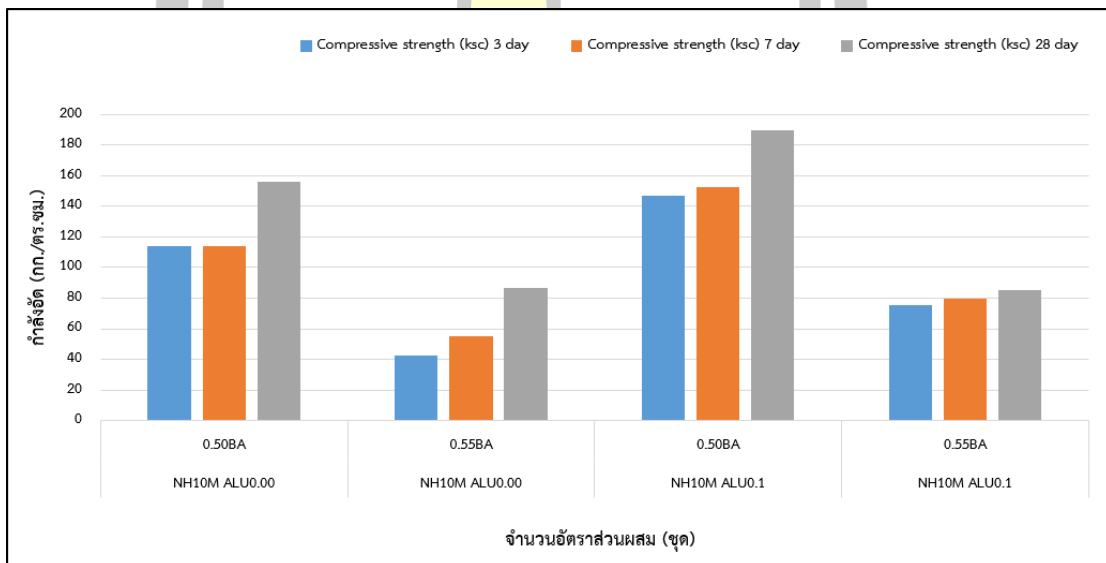
ออกแบบส่วนผสมไว้ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าทุกๆ งานวิจัยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ NH 10 โมลาร์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นดังกล่าวในการค้นหาจำนวนเศษอะลูมิเนียมที่ทำให้จีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมมีค่ากำลังอัดที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 8 กำลังจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่มีปริมาณการเติมเศษอะลูมิเนียมในอัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 4 5 7 10 12.5 และ 15 ของน้ำหนักเถ้าชานอ้อย

จากภาพประกอบ 8 แสดงของค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการใช้ความเข้มข้นที่ NH10 โมลาร์ จากการศึกษาที่ผ่านที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ซึ่งในการทดสอบนี้จะทดสอบการเติมเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 1 2 3 4 5 10 12.5 และ 15 ของเถ้าชานอ้อย อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบนำออกจากเตาอบแล้วบ่มต่อจนครบ 28 วันแล้วนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดทำการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ซึ่งผลปรากฏว่าปริมาณของเศษอะลูมิเนียมในแต่ละอัตราส่วนผสมมีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ต่างกัน โดยชุดที่ 5 ที่ความเข้มข้นของ NH 10 M การเติมเศษอะลูมิเนียมกับเถ้าชานอ้อยร้อยละ 4 มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 280.02 กก/ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน สูงกว่าชุดที่ 1 ที่ความเข้มข้นของ NH 10 M ไม่มีการเติมเศษอะลูมิเนียม

4.2.4 อัตราส่วนของ AL/BA ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ตารางที่ 7 แสดงค่าการรับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยที่ความละเอียดค้ำตะแกรง เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผสมเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณสัดส่วนที่กำหนด อัตราส่วนของ AL/BA ที่แตกต่างกัน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 1 : 1 และเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมกับเศษอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และการผสมเศษอะลูมิเนียมแทนที่ในเถ้าชานอ้อยปริมาณที่คงที่ เพื่อศึกษาอัตราส่วนของ AL/BA ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่ปริมาณเศษอะลูมิเนียมเท่ากันๆ ที่จำนวนร้อยละ 1 ของน้ำหนักเถ้าชานอ้อย เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม



ภาพประกอบ 9 กำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณของ AL/BA ต่างกัน

พหุ ประถมศึกษา

ตารางที่ 8 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนของ AL/BA แตกต่างกัน

No.	Mixed proportion	AL/BA	Compressive strength (ksc)		
			3 days	7 days	28 days
1	NH10M ALU _{0.00}	0.50BA	113.95	113.95	155.98
2	NH10M ALU _{0.00}	0.55BA	42.540	55.150	86.627
3	NH10M ALU _{0.1}	0.50BA	147.067	152.7	189.603
4	NH10M ALU _{0.1}	0.55BA	75.44	79.96	85.24

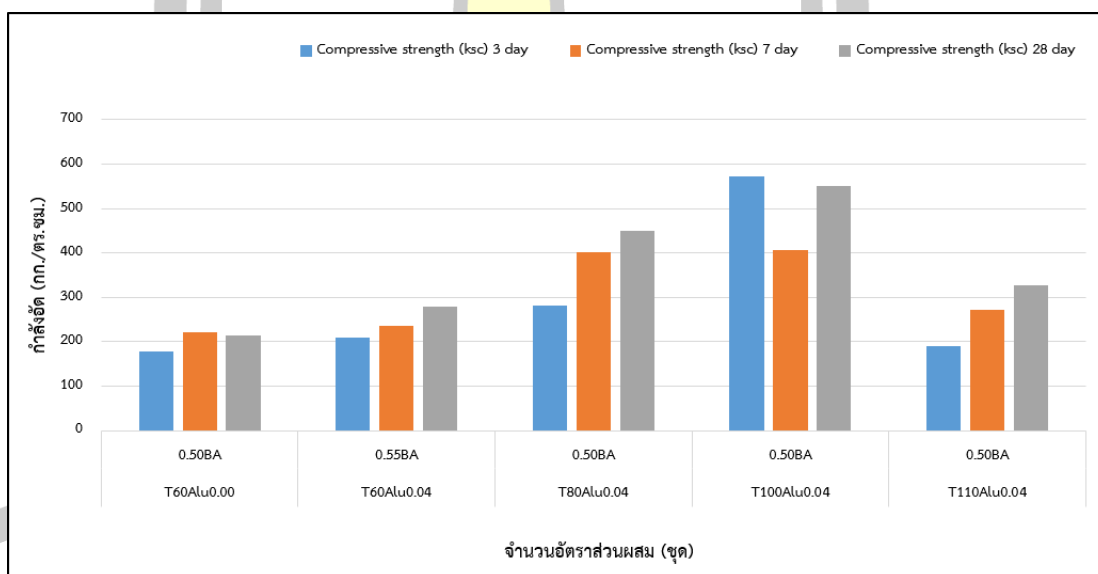
จากภาพประกอบ 9 แสดงของค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ใช้ความเข้มข้นที่ NH10 โมลาร์ เถ้าชานอ้อยทั้งหมดกับตัวอย่างแทนที่เศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.1 ของเถ้าชานอ้อย อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบนำออกจากเตาอบแล้วบ่มต่อจนครบ 28 วันแล้วนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดทำการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ซึ่งผลปรากฏว่าปริมาณของอัตราส่วน AL/BA ต่อกำลังอัด ซึ่งอัตราส่วนของ AL/BA ร้อยละ 0.5BA ให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ดี ทั้งตัวอย่างที่ไม่มีการเติมเศษอะลูมิเนียมและเติมอะลูมิเนียม ส่วนอัตราส่วนของ AL/BA ร้อยละ 0.55BA ให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมลดลง ดังปริมาณอัตราส่วนสารละลายอัลคาลีนต่อวัสดุตั้งต้น 0.50 BA จึงเหมาะสมที่นำมาเป็นในหนึ่งปัจจัยในการผลิตจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม สอดคล้องกับงานวิจัย (Puttala & Homwouttiwong, 2021) ที่ศึกษาการใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาลีนต่อวัสดุตั้งต้น 0.50BA-0.55BA

4.2.5 อุณหภูมิสำหรับการบ่ม ที่ใช้ในการบ่ม 60 80 และ 110 องศาเซลเซียสกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมจากข้อมูลการทดสอบที่ผ่านมา จะสามารถนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดสอบมาออกแบบอัตราส่วนผสมตามข้อมูลในตาราง 8 ซึ่งตามตารางดังกล่าวแสดงค่าการรับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากเถ้าชานอ้อยที่ความละเอียดค่าตกระง เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผสมเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณร้อยละ 0.04 อัตราส่วนของ AL/BA ร้อยละ 0.5BA สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 1 : 1 และเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมกับเศษอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 60 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิการบ่มที่

เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ซึ่งจากการทดสอบรายละเอียดดังตารางที่ 8

ตารางที่ 9 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่ใช้ในการบ่ม 60 80 และ 110 องศาเซลเซียส

No.	Mixed proportion	AL/BA	Compressive strength (ksc)		
			3 days	7 days	28 days
1	T60Alu _{0.00}	0.50BA	179.00	221.00	213.00
2	T60Alu _{0.04}	0.55BA	209.49	236.39	280.023
3	T80Alu _{0.04}	0.50BA	280.693	401.413	449.567
4	T100Alu _{0.04}	0.50BA	572.12	406.783	550.023
5	T110Alu _{0.04}	0.50BA	191.19	270.80	327.68



ภาพประกอบ 10 ค่ากำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่การบ่ม อุณหภูมิแตกต่างกัน

ซึ่งจากการนำข้อมูลตาราง 8 มาวิเคราะห์ด้วยการใช้กราฟตามรูปภาพประกอบ 10 แสดงของค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ใช้ความเข้มข้นที่ NH10 โมลาร์ เถ้าชานอ้อยทั้งหมดกับตัวอย่างแทนที่เศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.04 ของเถ้าชานอ้อย อัตราส่วน AL/BA ต่อ

กำลังอัด ซึ่งอัตราส่วนของ AL/BA ร้อยละ 0.5BA อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 60 80 100 และ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบนำออกจากเตาอบแล้วบ่มต่อจนครบ 28 วันแล้วนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดทำการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ซึ่งผลปรากฏว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม มีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเปรียบเทียบ T60Alu_{0.00} และ T100Alu_{0.04} การเพิ่มอุณหภูมิการบ่มจาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 100 องศาเซลเซียสมีค่าค่ากำลังอัดสูงสุดจากทุก ๆ ตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Puttala, et al., 2021) ที่ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งผลการทดลองพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงแปรผันต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์

ตารางที่ 10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

No.	Mixed proportion	AL / BA	Compressive strength (ksc)		
			3 days	7 days	28 days
1	50/50Alu0.00	0.50BA	179.00	221.00	213.00
2	50/50Alu0.04	0.50BA	376.41	390.33	368.05
3	55/45Alu0.04	0.50BA	453.24	430.81	400.87
4	60/40Alu0.04	0.50BA	243.89	301.22	312.47
5	65/35Alu0.04	0.50BA	242.55	208.06	249.31
6	50/50Alu0.06	0.50BA	502.48	366.87	366.87
7	55/45Alu0.06	0.50BA	424.29	436.74	556.98
8	60/40Alu0.06	0.50BA	354.24	368.82	268.94
9	65/35Alu0.06	0.50BA	509.7	201.87	271.99
10	50/50Alu0.08	0.50BA	402.2	320.46	338.25
11	55/45Alu0.08	0.50BA	427.97	308.47	359.91
12	60/40Alu0.08	0.50BA	520.27	318.12	327.68
13	65/35Alu0.08	0.50BA	493.97	183.05	259.36

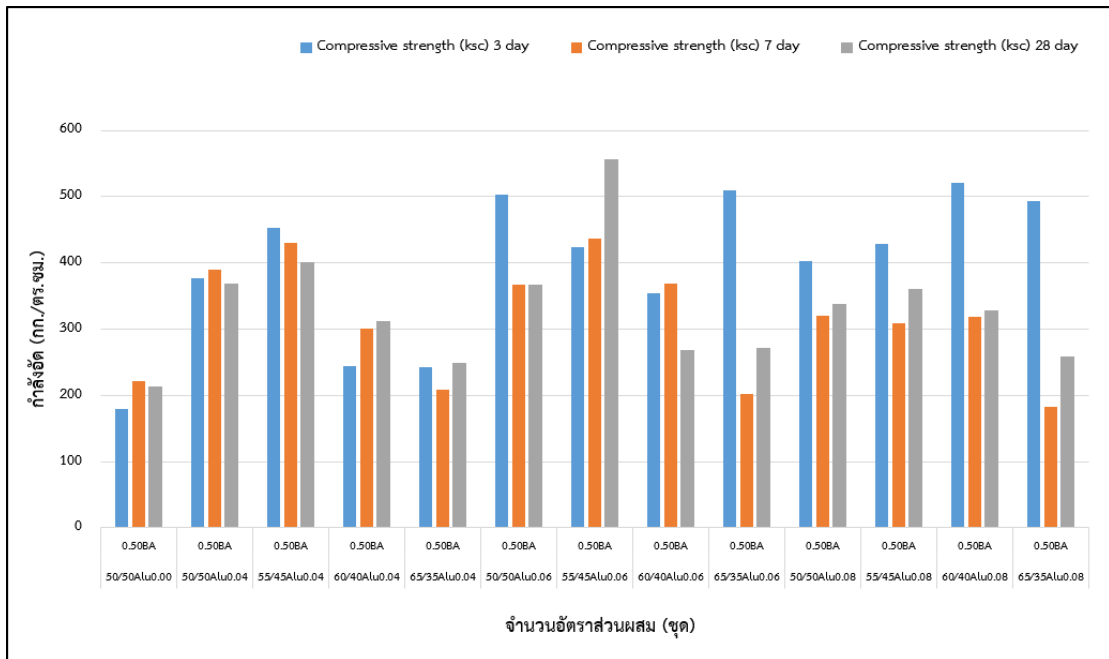
4.2.6 อัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต NH/NS ที่อัตราส่วน 50:50 45:55 40:60 และ 35:65 ซึ่งปริมาณอัตราส่วนไม่เกินสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น AL/BA เท่ากับ 0.5 ตาราง 9 เป็นการแสดงค่าการรับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยที่ความละเอียดค้ำตะแกรง เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผสมเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณร้อยละ 0.04 อัตราส่วนของ AL/BA ร้อยละ 0.5BA สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสารละลาย

โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่อัตราส่วน 50:50 45:55 40:60 และ 35:65 ซึ่งในตารางที่ 10 จะใช้สัญลักษณ์ xxNH/yyNS ค่าสัมประสิทธิ์ xx หน้า NH คือปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ yy หน้า NS คือปริมาณของโซเดียมซิลิเกต และเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมกับเศษอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 80 และ 110 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

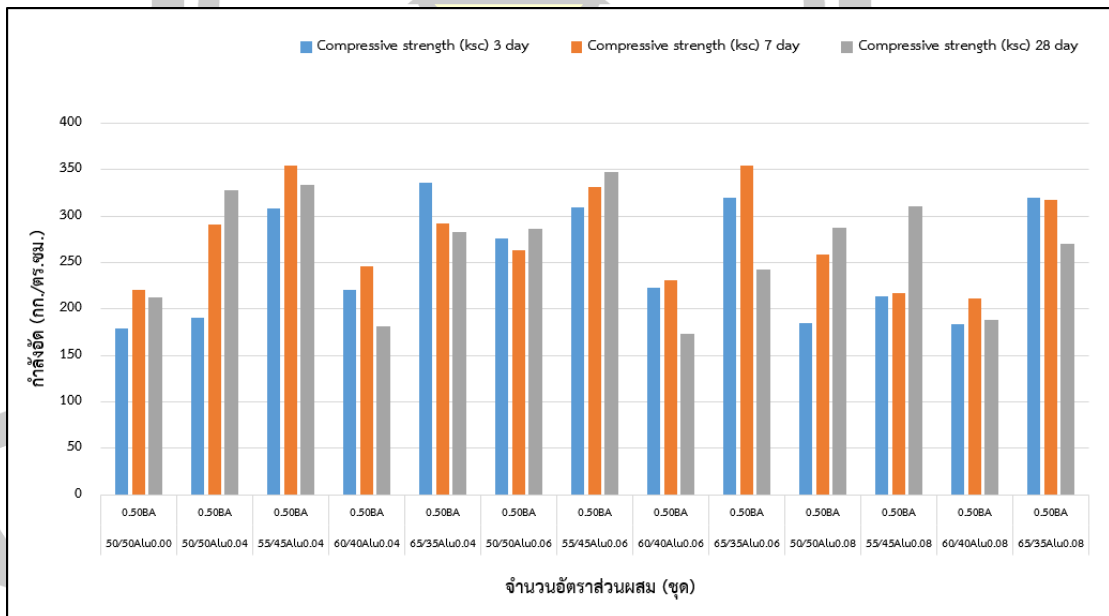
ตารางที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกัน บ่มที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

No.	Mixed proportion	AL/BA	Compressive strength (ksc)		
			3 days	7 days	28 days
1	50/50Alu0.00	0.50BA	179.00	221.00	213.00
2	50/50Alu0.04	0.50BA	190.30	290.80	327.68
3	55/45Alu0.04	0.50BA	307.82	354.89	333.40
4	60/40Alu0.04	0.50BA	220.01	245.42	180.85
5	65/35Alu0.04	0.50BA	335.93	292.11	283.35
6	50/50Alu0.06	0.50BA	276.32	263.17	286.65
7	55/45Alu0.06	0.50BA	309.96	331.06	347.30
8	60/40Alu0.06	0.50BA	223.01	231.52	172.74
9	65/35Alu0.06	0.50BA	319.46	354.50	242.09
10	50/50Alu0.08	0.50BA	184.41	258.34	287.62
11	55/45Alu0.08	0.50BA	213.76	217.47	310.30
12	60/40Alu0.08	0.50BA	184.08	211.41	187.95
13	65/35Alu0.08	0.50BA	319.43	317.63	270.19

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพประกอบ 11 กำลังจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกันไป บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 12 กำลังจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนของ NH/NS แตกต่างกันไป บ่มที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

จากภาพประกอบ 11 และ 12 แสดงของค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ใช้ความเข้มข้นที่ NH10 โมลาร์ เถ้าชานอ้อยทั้งหมดกับตัวอย่างเดิมเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.04 0.06 และ 0.08 ของเถ้าชานอ้อย อัตราส่วน AV/BA ร้อยละ 0.5BA อัตราส่วน NH/NS ที่ 50 : 50 55 : 45 60 : 40 และ 65 : 35 อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 80 และ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบนำออกจากเตาอบแล้วบ่มต่อจนครบ 28 วัน แล้วนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดทำการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบที่แล้วว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) 10 M เศษอะลูมิเนียมร้อยละ 4 ของเถ้าชานอ้อย อุณหภูมิที่ใช้การเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่ดีที่สุด คือ 100 องศาเซลเซียส ที่ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 550.02 กก.ต่อตร.ซม ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ศึกษาตัวแปรที่สามารถพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม ดังนั้นตัวแปรที่จะพิจารณาคืออัตราส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต NH/NS โดยกำหนดตามตาราง 10 และ 11 ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวนำมาจัดเรียงด้วยกราฟตามภาพประกอบ 11 และ 12 จากการศึกษาผลปรากฏว่า ที่อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต NH/NS 55 : 45 ปริมาณเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.06 และอุณหภูมิของการบ่มที่ 80 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 556.98 กก./ตร.ซม ผลดังกล่าวแตกต่างไปจากการทดสอบที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ คือกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มีกำลังอัดที่สูงขึ้น ปริมาณความต้องการเศษอะลูมิเนียมในอัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น แต่ใช้อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาการเกิดจีโอโพลีเมอร์ลดลง และทดสอบต่อไปโดยใช้อัตราส่วนดังกล่าว แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาการเกิดจีโอโพลีเมอร์เป็น 110 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลง ดังนั้นอัตราส่วนของ NH/HS ปริมาณเศษอะลูมิเนียม และอุณหภูมิมีผลต่อกำลังอัดจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม งานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับ (Amin, Khattak, Noor, & Ferroze, 2016) ที่ศึกษาอัตราส่วนของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต (NH/NS)

พูนุ ปณุกิตโต ชิว

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เก้าชาน อ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมในงานวิจัยครั้งนี้ทั้งหมด 6 ตัวแปร ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้จะขอสรุปผลการวิจัยและอภิปรายผลของแต่ละตัวแปร ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

5.1 ความเข้มข้นของ NH มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์

จากผลการทดสอบใช้ NH ที่ความเข้มข้น 7.5 10 12.5 และ 15 โมลาร์พบว่าความเข้มข้นที่ 12.5 และ 15 โมลาร์ ให้ค่ากำลังอัดสูงในช่วงระยะ 3 - 14 วันหลังจากนั้นกำลังอัดลดลงเรื่อย ๆ ตามอายุของการบ่ม และระหว่างการศึกษาพบว่ายิ่งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดความร้อนสูงและเป็นอันตราย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ NH ความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ จากผลการทดสอบพบว่ามีความเหมาะสมนำไปพัฒนากำลังอัดของแท่งตัวอย่างของจีโอโพลีเมอร์ เพื่อลดปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

5.2 ปริมาณน้ำในสำหรับที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตพบว่าอัตราส่วนผสมที่ทำให้จีโอโพลีเมอร์ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือส่วนผสมที่ใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) 10 M ปริมาณน้ำสูงสุดที่ทำให้มีกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์สูงสุดคือ 5% ของน้ำหนักเก้าชานอ้อยเท่านั้น รายละเอียดตามผลการทดสอบ

5.3 ปริมาณของเศษอะลูมิเนียมที่เหมาะสมกับการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

จากผลการทดสอบร้อยละ 0.04 - 0.06 มีแนวโน้มกำลังอัดสูงอย่างมีนัยสำคัญ สามารถใช้พัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จากเก้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมได้

5.4 อัตราส่วนของ AL/BA ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสม เศษอะลูมิเนียม

จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของ AL/BA ร้อยละ 0.5BA ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดดังนั้น AL/BA ร้อยละ 0.5BA จึงเหมาะสมกับนำมาใช้ผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

5.5 อุณหภูมิสำหรับการบ่ม ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสม เศษอะลูมิเนียม

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้จีโอโพลีเมอร์มีค่ากำลังอัดสูงสุด อุณหภูมิที่เหมาะสมมีตั้งแต่ 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส

5.6 อัตราส่วนของ NH/NS ที่เหมาะสมกับการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสม เศษอะลูมิเนียม

จากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนของ NH/NS ที่ 55 : 45 และปริมาณของเศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0.06 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 556.98 กก./ตร.ซม ดังนั้นจากที่กล่าวมาทั้งหมดจึงสามารถสรุปได้ว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม อัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีผลต่อกำลังอัดสูงสุดต้องใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ ปริมาณเศษอะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 0.06 และบ่มที่อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส และยังพบอีกว่าปริมาณเศษอะลูมิเนียมมีผลต่ออัตราส่วนของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต NH/NS จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต NH/NS ใช้ 50 : 50 และผสมเศษอะลูมิเนียมปริมาณร้อยละ 0.04 ให้ค่ากำลังอัด 280.02 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วันบ่มที่ 60 องศาเซลเซียสและเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัด 449.57 550.02 และ 327.68 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 ตามลำดับ ถึงแม้ตัวอย่างที่มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เห็นว่ากำลังอัดมีค่าสูงช่วงต้นและมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงตามอายุการบ่ม แต่เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต NH/NS เป็นอัตราส่วน NH/NS 55 : 45 พบว่าค่ากำลังอัดของแห้งตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0.04 ค่ากำลังมีอัดลดลงแต่ตัวอย่างที่มีเศษอะลูมิเนียมผสมร้อยละ 0.06 ก็มีกำลังเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียมที่ให้กำลังอัดที่ดีที่สุดต้องใช้เศษอะลูมิเนียมอยู่ระหว่าง 0.04 - 0.06 ต้องใช้อัตราส่วน NH/NS ไม่เกิน 50 : 50 และ 55 : 45 และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มอยู่ระหว่าง 80 - 100 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ของคอนกรีตที่ใช้ในทางกำหนดแนวทางพัฒนากำลังจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

บรรณานุกรม

- Aleem, M. A., & Arumairaj, P. (2012). Geopolymer concrete—a review. *International journal of engineering sciences & emerging technologies*, 1(2), 118-122.
- Amin, N.-u., Alam, S., & Gul, S. (2016). Effect of thermally activated clay on corrosion and chloride resistivity of cement mortar. *Journal of Cleaner Production*, 111, 155-160.
- Amin, N.-u., Khattak, S., Noor, S., & Ferroze, I. (2016). Synthesis and characterization of silica from bottom ash of sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 117, 207-211.
- Askarian, M., Tao, Z., Adam, G., & Samali, B. (2018). Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete. *Construction and building materials*, 186, 330-337.
- ASTM-C618. (2015). Standard test method for coal fly ash and raw calcined natural pozzolan for use in concrete: ASTM C618, ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658-670.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and building materials*, 23(11), 3352-3358.
- Duxson, P., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W. M., & Van Deventer, J. S. (2007). The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292(1), 8-20.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. (2003). *Geopolymer concrete: turn waste into environmentally friendly concrete*. Paper presented at the

International Conference on Recent Trends in Concrete Technology and Structures (INCONTEST).

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.

Mejía, J. M., Rodríguez, E., de Gutiérrez, R. M., & Gallego, N. (2015). Preparation and characterization of a hybrid alkaline binder based on a fly ash with no commercial value. *Journal of Cleaner Production*, 104, 346-352.

Onutai, S., Jiemsirilerts, 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.

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 & Design*, 53, 269-274.

Punlert, S., & Laoratanakul, P. (2013). การ ศึกษา การนำ วัสดุ เหลือใช้ จาก อุตสาหกรรม มา ใช้ ประโยชน์ ใน งาน คอนกรีต. *Journal of Community Development Research (Humanities and Social Sciences)*, 4(2), 26-38.

Puttala, S., Hiranphattararoj, W., & Homwuttiwong, S. (2021). Development of a geopolymer made from bagasse ash for use a cementitious material. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 26(4), 10.

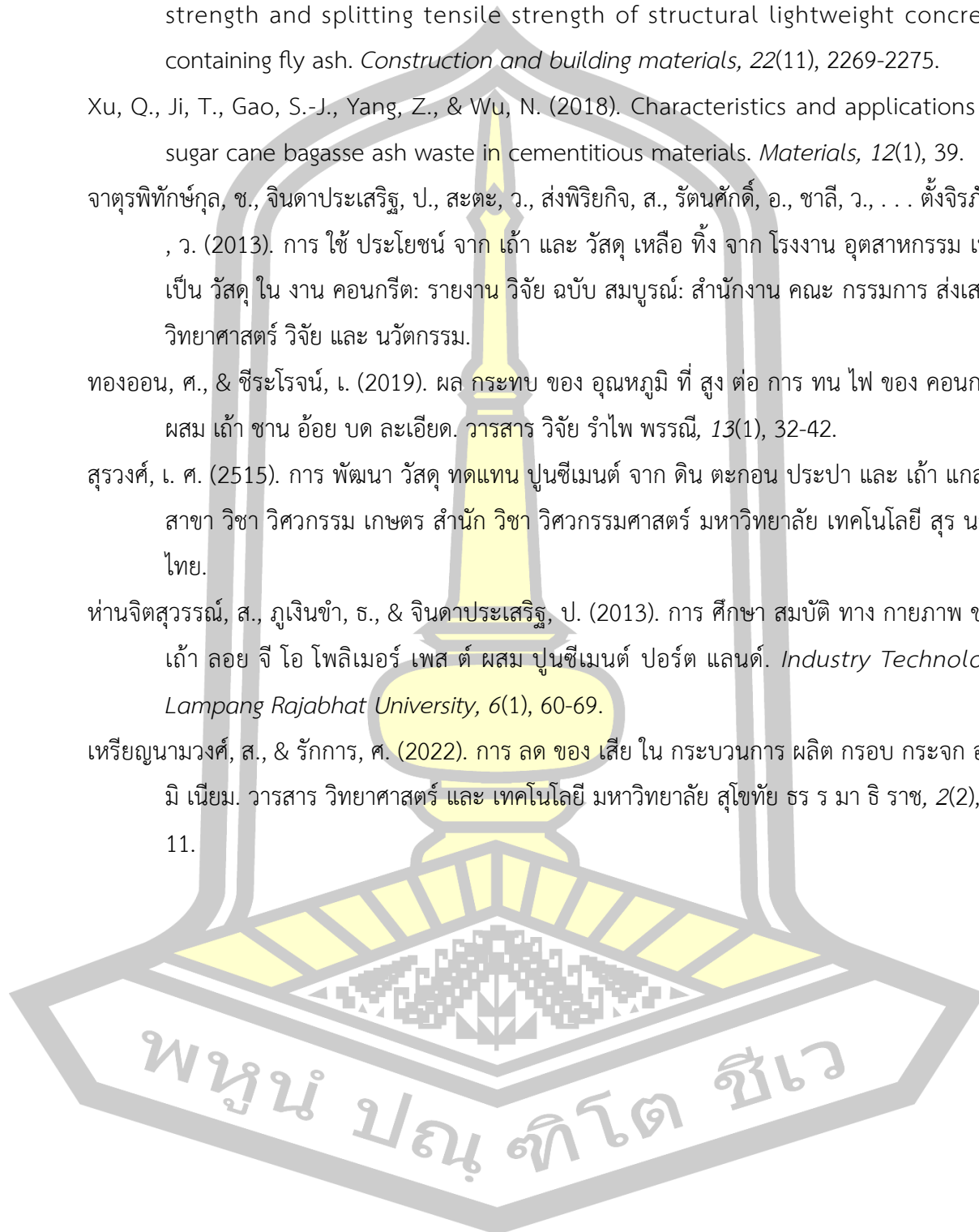
Puttala, S., & Homwuttiwong, S. (2021). *Development of Geopolymer Concrete from Bagasse Ash and Waste Materials*. Mahasarakham University.

Puttala, S., Ongwande, M., Homwuttiwong, K., & Homwuttiwong, S. (2022). STRENGTH ENHANCEMENT BY COMBINED THE CALCINED WATER SUPPLY SLUDGE IN BAGASSE ASH GEOPOLYMER CONCRETE. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 17(20), 1845-1852.

Rukzon, S., & Chindaprasirt, P. (2012). Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials & Design*, 34, 45-50.

Singh, N., Singh, V., & Rai, S. (2000). Hydration of bagasse ash-blended portland cement. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1485-1488.

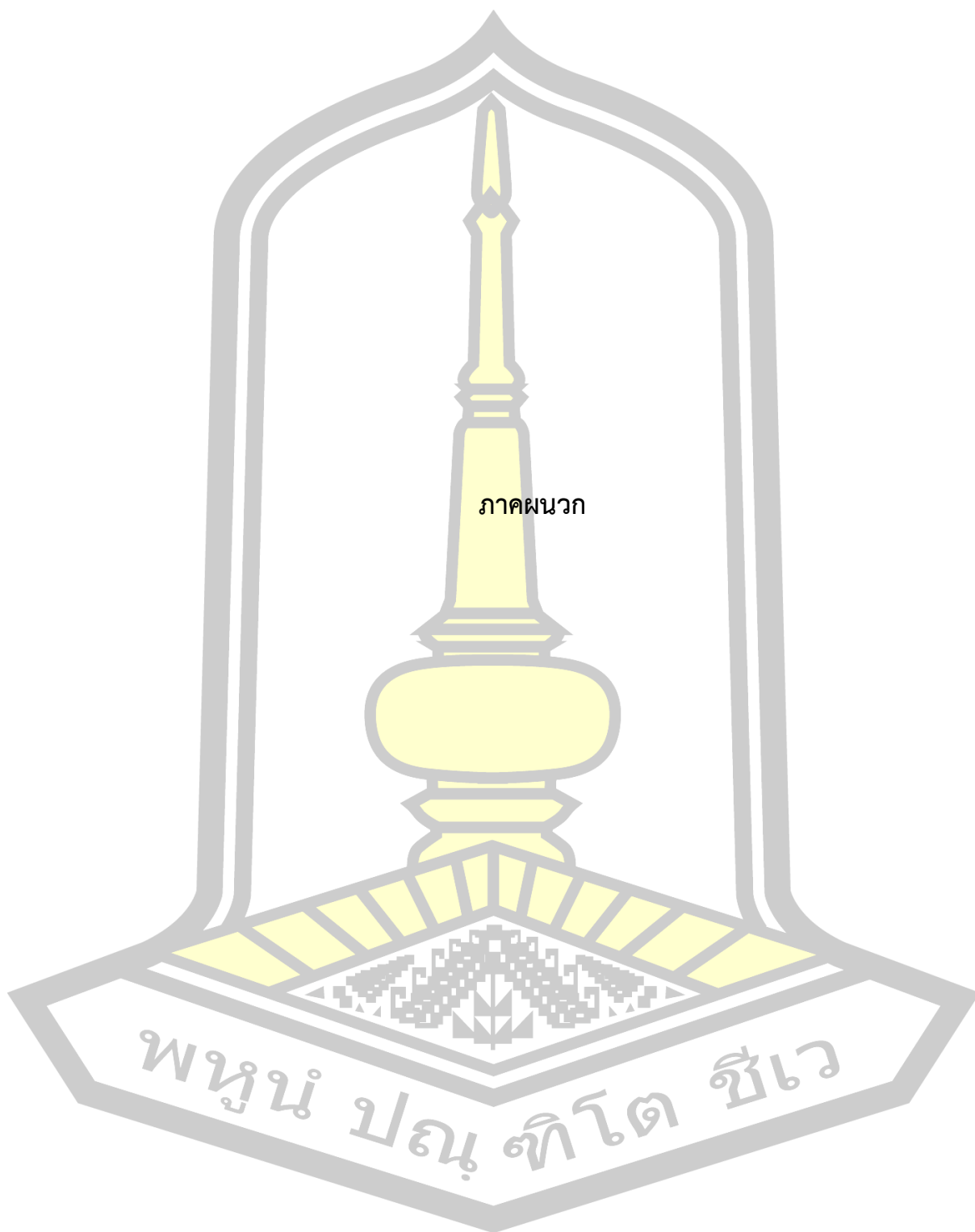
- Tanyildizi, H., & Coskun, A. (2008). The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Construction and building materials*, 22(11), 2269-2275.
- Xu, Q., Ji, T., Gao, S.-J., Yang, Z., & Wu, N. (2018). Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, 12(1), 39.
- จาดุรพิทักษ์กุล, ช., จินดาประเสริฐ, ป., สะตะ, ว., ส่งพิริยกิจ, ส., รัตนศักดิ์, อ., ชาลี, ว., . . . ตั้งจิรภัทร, ว. (2013). การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และ นวัตกรรม.
- ทองออน, ศ., & ชีระโรจน์, เ. (2019). ผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงต่อการทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด. *วารสารวิจัยรำไพพรรณี*, 13(1), 32-42.
- สุรวงศ์, เ. ศ. (2515). การพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ไทย.
- ห่านจิตสุวรรณ, ส., ภูเงินขำ, ธ., & จินดาประเสริฐ, ป. (2013). การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์เพสต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. *Industry Technology Lampang Rajabhat University*, 6(1), 60-69.
- เหรียญนามวงศ์, ส., & รักการ, ศ. (2022). การลดของเสียในกระบวนการผลิตกรอบกระจกอลูมิเนียม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช*, 2(2), 1-11.



ประวัติผู้เขียน

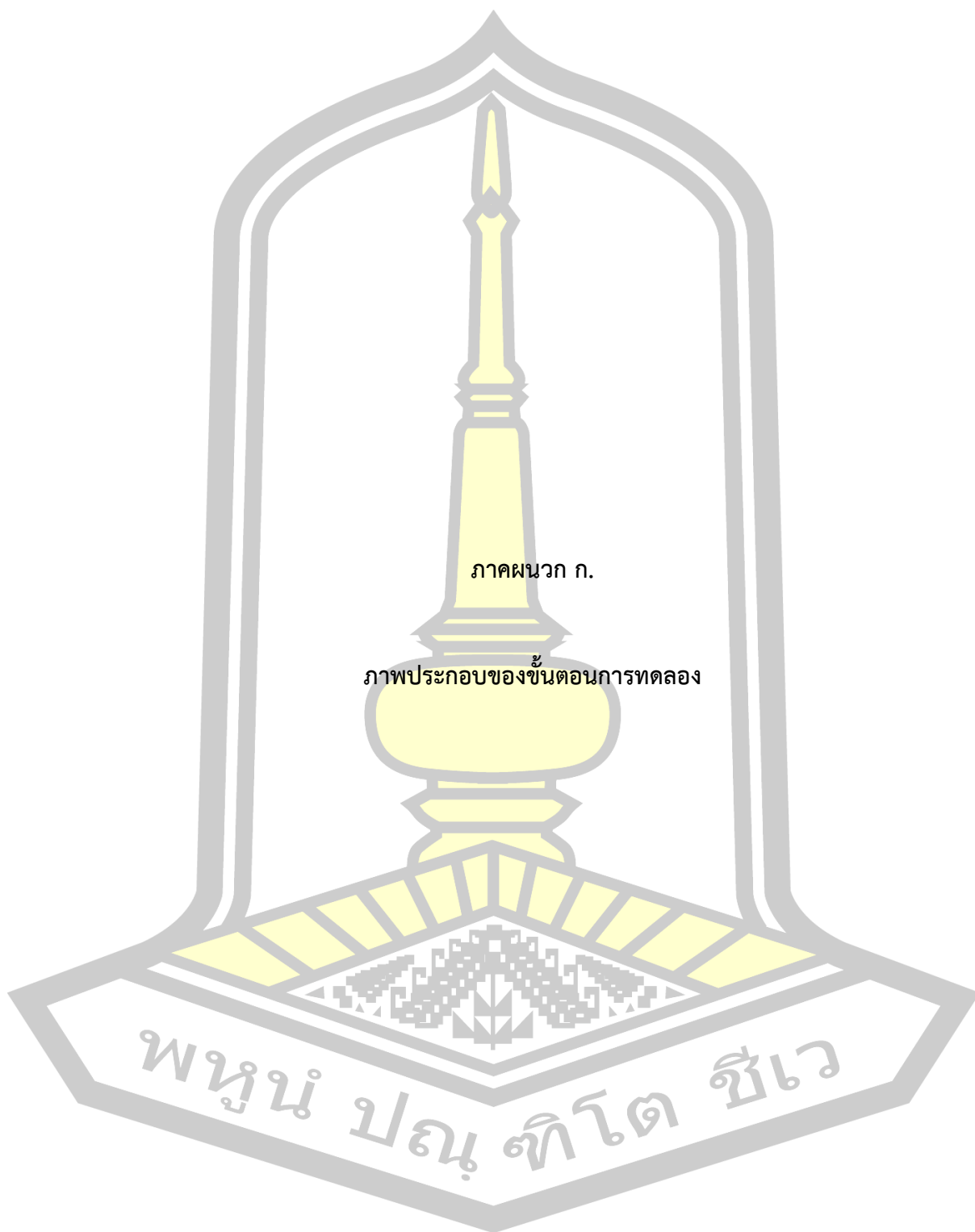
ชื่อ	นายกิตติ อ่อนมาก
วันเกิด	29 กรกฎาคม พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 236 หมู่ 17 ตำบลเขวา อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดมหาสารคาม เลขที่ 207 หมู่ 11 ตำบลแวงน่าง อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2542 ประกาศวิชาซีพ (ปวช.) สาขาช่างสำรวจ วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม พ.ศ.2545 ประกาศวิชาซีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาช่างโยธา วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม พ.ศ.2549 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	-

พูน ปณ ทัโต ชีเว



ภาคผนวก

พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว



ภาคผนวก ก.

ภาพประกอบของขั้นตอนการทดลอง

พหุ ประทีป ชีวะ



ภาพประกอบ ก. 1 เศษอลูมิเนียมที่ยังไม่ผ่านการบด



ภาพประกอบ ก. 2 เศษอลูมิเนียมที่ผ่านการบดผ่านตะแกรงเบอร์ 30



ภาพประกอบ ก. 3 เศษอลูมิเนียมที่ผ่านการบดผ่านตะแกรงเบอร์ 200



ภาพประกอบ ก. 4 ถ้ำชานอ้อยดั้งเดิมที่ผ่านการบดละเอียด



ภาพประกอบ ก. 5 เครื่องสำหรับบดแบบตกระทาบ



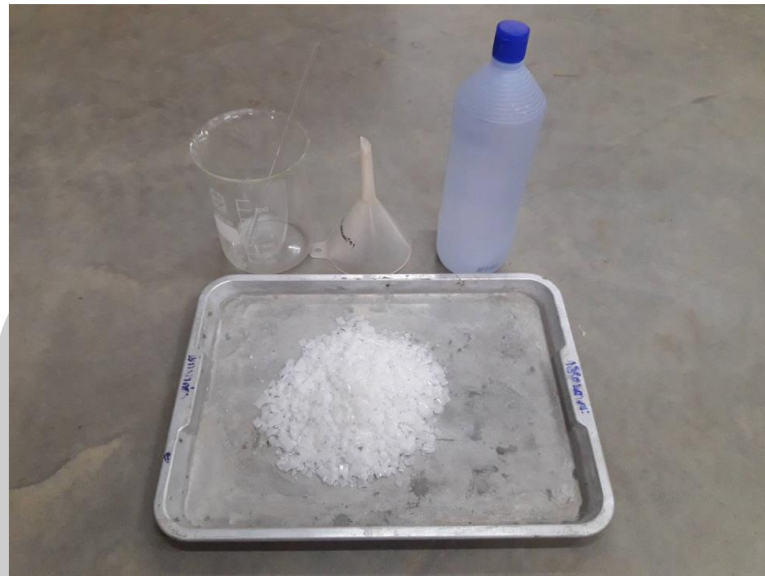
ภาพประกอบ ก. 6 ชุดทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียด



ภาพประกอบ ก. 7 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำ และสารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพประกอบ ก. 8 ชุดทดสอบหาขนาดอนุภาคค้ำบนตะแกรง



ภาพประกอบ ก. 9 อุปกรณ์ในการเตรียมสารละลาย

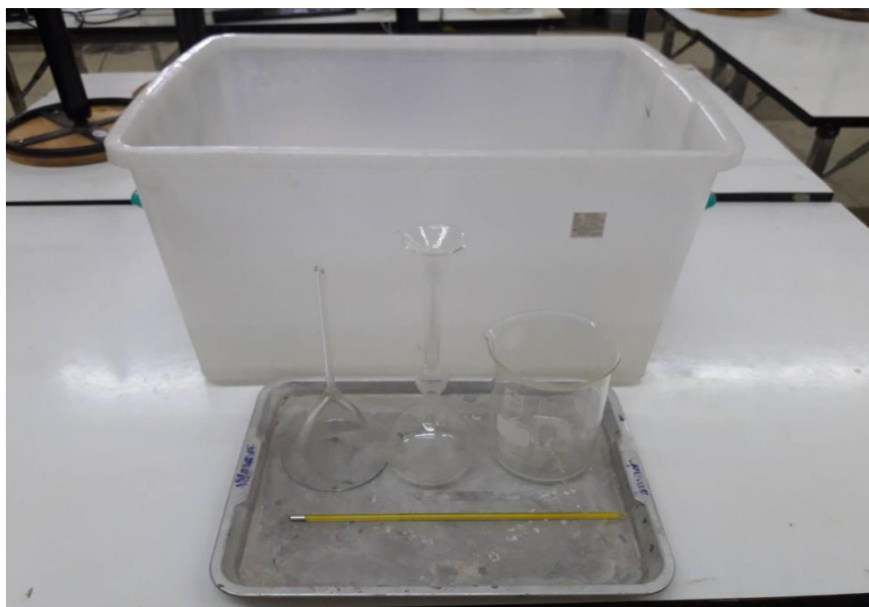


ภาพประกอบ ก. 10 ชุดเครื่องมือทดสอบไวแคต Vicat Apparatus



ภาพประกอบ ก. 11 เตาเผาอุณหภูมิสูง

พหุพันธ์ ปริญญาตรี ชีวะ



ภาพประกอบ ก. 12 ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นชานอ้อย



ภาพประกอบ ก. 13 การผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



ภาพประกอบ ก. 14 จีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จ



ภาพประกอบ ก. 15 ลักษณะจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่แกะออกจากแบบหล่อ