

ผลของปริมาณบอแรกซ์และเถ้ากลบต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Borax and Rice Husk Ash on Properties of High Calcium Fly Ash Based
Geopolymer Mortar



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของปริมาณบอแรกซ์และเถ้าแกลบต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง
โดย	นายกิตติ์ จันทรประสิทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.กิม เหนือคลอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.กิม เหนือคลอง)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ)	

กิตติ์ จันทรประสิทธิ์ : ผลของปริมาณบอแรกซ์และเถ้าแกลบต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์
มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง. (Effects of Borax and Rice Husk Ash on
Properties of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer Mortar) อ.ที่ปรึกษา
หลัก : ผศ. ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.กิม เหนือคลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์ที่
เรียกว่า “บอโรลูมิโนซิลิเกต (BASG)” ซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนเชื่อม
ประสานของจีโอโพลิเมอร์ทำจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) โซเดียมซิลิเกต
(NS) และบอแรกซ์ ทุกส่วนผสมใช้สัดส่วนเถ้าลอยต่อทรายคงที่เท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ใช้
อัตราส่วน NS/NH โดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1, 0.75:1 และ 0.5:1 ใช้บอแรกซ์แทนที่ NS ในปริมาณ
0%, 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก และศึกษาการใช้เถ้าแกลบ (RHA) ในการพัฒนากำลังรับ
แรงและความทนน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้ RHA ในปริมาณ 0%, 3.6%, 4.8% และ
6.0% โดยน้ำหนักของเถ้าลอย จากการทดสอบพบว่า การแทนที่ NS ด้วยบอแรกซ์ส่งผลให้
ความสามารถทำงานได้และความแข็งแรงของมอร์ตาร์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่
ไม่ผสม RHA พบว่า BASG มอร์ตาร์ที่ผสม RHA มีกำลังอัด กำลังดัด และความทนน้ำที่ดีกว่า ผล
การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคบ่งชี้ว่าการใส่ RHA ช่วยเพิ่มสัดส่วน Si/Al ของจีโอโพลิเมอร์เจล
โดยกำลังรับแรงอัดของ BASG มอร์ตาร์ที่ผสม RHA มีค่าสูงสุดเท่ากับ 58.6 MPa

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070431021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: fly ash, rice husk ash, RHA, borax, geopolymer, boroaluminosilicate

Kit Janprasit : Effects of Borax and Rice Husk Ash on Properties of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer Mortar. Advisor: Asst. Prof. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D. Co-advisor: Peem Nuaklong, Ph.D.

The primary goal of this study is to improve the properties of geopolymer material made from borax, called “boroaluminosilicate geopolymer (BASG)”, which is one of the environment-friendly cement-based materials. The geopolymer binder was prepared from high calcium fly ash, sodium hydroxide (NH), sodium silicate (NS) and borax. For all mixtures, the fly ash-to-sand ratio was kept constant at 1:2.75 by weight. The NS/NH weight ratios of 1:1, 0.75:1 and 0.5:1 are used. At each NS/NH ratio, the NS solution was replaced with borax at the levels of 0%, 10%, 20% and 30% by weight. In addition, the use of rice husk ash (RHA) to improve the strengths and water impermeability of geopolymer mortar was studied. The RHA addition was carried out at levels of 0%, 3.6%, 4.8% and 6.0% of fly ash content (by weight). The results showed that the replacement of NS with borax causes a reduction in workability and strengths of mortar. In comparison to the control mixture without RHA, the BASG mortar with RHA has better compressive strength, flexural strength, and water impermeability. The microstructure observation indicated that the addition of RHA increased the Si/Al ratio of geopolymer gel. The compressive strength of RHA-added BASG mortar can be as high as 58.6 MPa.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU_GR_62_48_21_05) ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนเก้าอี้กลบที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณ ดร.กิม เหนือคลอง, นาย อติสร ชวนปี, นางสาว ปัทสรา วรวัฒนฤนาท และอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ที่ให้เกียรติมาช่วยในการปฏิบัติงานวิจัยและให้คำปรึกษา มาตลอด และขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนงานวิจัยมาโดยตลอด

กิตติ์ จันทร์ประสิทธิ์



สารบัญ

หน้า

.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4.2 สามารถพัฒนาสมบัติของ BASG โดยใช้เถ้าแก้วได้.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	4
2.1 เถ้าลอย.....	4
2.2 จีโอโพลิเมอร์.....	5
2.3 สารละลายต่าง.....	6
2.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, NH).....	6
2.3.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na ₂ SiO ₃ , NS).....	8
2.4 การใช้งานบอแรกซ์ในอัลคาไลซีเมนต์.....	9

2.5	เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)	14
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย.....	17
3.1	สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	17
3.1.1	สัดส่วนผสมสำหรับการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน (NS+B)/NH ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	17
3.1.2	สัดส่วนผสมสำหรับการศึกษาสมบัติของ BASG ที่ผสมเถ้าแกลบ.....	20
3.2	ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	23
3.3	รายละเอียดการทดสอบต่างๆ	23
3.4	การวิเคราะห์ผล	24
บทที่ 4	ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	26
4.1	ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	26
4.1.1	ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโดยวิธีเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ X-ray fluorescence (XRF)	26
4.1.2	ผลการทดสอบโดยวิธีเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD)	27
4.2	ผลการทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	29
4.2.1	อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	29
4.2.2	อิทธิพลของปริมาณการแทนที่โซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	31
4.2.3	สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบเพิ่มร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6 ของน้ำหนักเถ้าลอย	43
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	62
5.1	สรุปผลการทดสอบ	62
5.2	ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	65

ประวัติผู้เขียน..... 109



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน (NS+B)/NH ที่ส่งผลต่อสมบัติของ BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง	18
ตารางที่ 2 ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน (NS+B)/NH ที่ส่งผลต่อสมบัติของ BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบอบแห้ง	19
ตารางที่ 3 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณแก้วกลบที่เหมาะสมใน BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง	21
ตารางที่ 4 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณแก้วกลบที่เหมาะสมใน BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบอบแห้ง	22
ตารางที่ 5 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ทดสอบ	24
ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยแคลเซียมสูง (HCF) และ แก้วกลบ	26
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง BASG.....	33
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมแก้วกลบ	44
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDS).....	60
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุบอโรลูมินซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบอบ (ข้อมูลดิบ)	70
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุบอโรลูมินซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบ (ข้อมูลดิบ).....	73
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างผสมบอแรกซ์แบบอบและแก้วกลบ (ข้อมูลดิบ)	76
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างผสมบอแรกซ์แบบไม่อบและแก้วกลบ (ข้อมูลดิบ)	79
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์ไม่อบ (ข้อมูลดิบ).....	83
ตารางที่ 15 ผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์อบ (ข้อมูลดิบ).....	87

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบปริมาณโพรงและดูดซึมน้ำเมื่อแทนที่ด้วยบอแรกซ์แบบอบแห้ง และ เสริมกำลังด้วยเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ).....	90
ตารางที่ 17 ผลการทดสอบปริมาณโพรงและดูดซึมน้ำเมื่อแทนที่ด้วยบอแรกซ์แบบไม่อบ และ เสริมกำลังด้วยเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ).....	94
ตารางที่ 18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมบอแรกซ์ไม่อบและเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ).....	98
ตารางที่ 19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมบอแรกซ์อบและเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ).....	101
ตารางที่ 20 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมบอแรกซ์ไม่อบและเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ).....	106



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 ปริมาณการปล่อย CO ₂ และก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) ในแต่ละส่วนทั่วโลก (Baumert et al., 2005).....	1
รูปที่ 2 การขนส่งถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (จิรภัทร ขำญาติ, 2546).....	4
รูปที่ 3 รูปทรงถ้ำลอย ขนาด 10 ไมโครเมตร (จิรภัทร ขำญาติ, 2546).....	5
รูปที่ 4 กระบวนการการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Zhuang et al., 2016).....	6
รูปที่ 5 ผิวของถ้ำลอยที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 10 นาที.....	7
รูปที่ 6 อิทธิพลของความเข้มข้น NaOH กับ อัตราส่วนระหว่าง Na ₂ SiO ₃ และ NaOH ต่อความสามารถในการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	8
รูปที่ 7 กระบวนการการผลิตโซเดียมซิลิเกต (Shi et al., 2006).....	9
รูปที่ 8 Microstructure ของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบบอบแห้ง.....	10
รูปที่ 9 Microstructure ของ Boroaluminosilicate Geopolymer (Nazari et al., 2014).....	11
รูปที่ 10 Microstructure ของ Aluminosilicate Geopolymer (Nazari et al., 2014).....	12
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละของโซเดียมซิลิเกตที่ลดลง.....	13
รูปที่ 12 ผลกระทบจากการเพิ่มปริมาณบอแรกซ์ (Ali. Bagheri et al., 2017).....	13
รูปที่ 13 ผลจากการทดสอบ SEM ของตัวอย่างที่ไม่มีบอแรกซ์ (a) และตัวอย่างที่มีบอแรกซ์ (b)	14
รูปที่ 14 ผลจากการควบคุมอุณหภูมิในการเผาแกลบ (Kang et al., 2019).....	15
รูปที่ 15 ผลการทดสอบ SEM เปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของ NaOH ที่ 12M (a), 14M (b) และ 16M (c) (Kaur et al., 2018).....	16
รูปที่ 16 ผลการทดสอบ XRD ของ ถ้ำลอย (HCF), บอแรกซ์แบบบอบแห้ง (AB), บอแรกซ์ (NB) และ ถ้ำแกลบ (RHA).....	28
รูปที่ 17 ความสามารถในการไหลผ่าน (Flowability) ของส่วนผสมที่มีอัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 โดยน้ำหนัก.....	29

รูปที่ 18 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสม NS/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ.....	30
รูปที่ 19 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสม NS/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ.....	31
รูปที่ 20 ค่าการไหลผ่านของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบบอบแห้งร้อยละ 10, 20 และ 30	32
รูปที่ 21 ค่าการไหลผ่านของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบร้อยละ 10, 20 และ 30.....	32
รูปที่ 22 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง ร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ.....	34
รูปที่ 23 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบบอบแห้ง ร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ	35
รูปที่ 24 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1 ที่บอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบบอบแห้งและไม่อบแห้ง	36
รูปที่ 25 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.75 ที่บอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบบอบแห้งและไม่อบแห้ง	36
รูปที่ 26 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 ที่บอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบบอบแห้งและไม่อบแห้ง	37
รูปที่ 27 กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 โดยผสมบอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบไม่อบแห้งตามลำดับ.....	38
รูปที่ 28 กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 โดยผสมบอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบบอบแห้งตามลำดับ.....	38
รูปที่ 29 โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB0, 0.5-NB20 และ 0.5-NB30	40
รูปที่ 30 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB20 และ 0.5-AB20.....	41
รูปที่ 31 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง BASG	42
รูปที่ 32 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่ผสมบอแรกซ์.....	45
รูปที่ 33 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 10.....	46
รูปที่ 34 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 20.....	46

รูปที่ 35 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 30.....	47
รูปที่ 36 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ASG) ที่ผสมเถ้าแกลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6	48
รูปที่ 37 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 10 และ เถ้าแกลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6.....	48
รูปที่ 38 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 20 และ เถ้าแกลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6.....	49
รูปที่ 39 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (BASG) ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 30 และเถ้าแกลบ ที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6.....	49
รูปที่ 40 โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB0-3.6RHA, 0.5-NB0-4.8RHA และ 0.5-NB0-6RHA.....	51
รูปที่ 41 โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB20-3.6RHA, 0.5-NB20-4.8RHA และ 0.5-NB20-6RHA.....	52
รูปที่ 42 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB0-3.6RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	53
รูปที่ 43 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB0-4.8RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	54
รูปที่ 44 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB0-6RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	55
รูปที่ 45 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB20-3.6RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	56
รูปที่ 46 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB20-4.8RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	57
รูปที่ 47 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-AB20-4.8RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	58
รูปที่ 48 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB20-6RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	59

รูปที่ 49 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง ASG ที่ผสมแก้วกลม.....	61
รูปที่ 50 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง BASG ที่ผสมร้อยละ 20 และผสมแก้วกลม.....	61



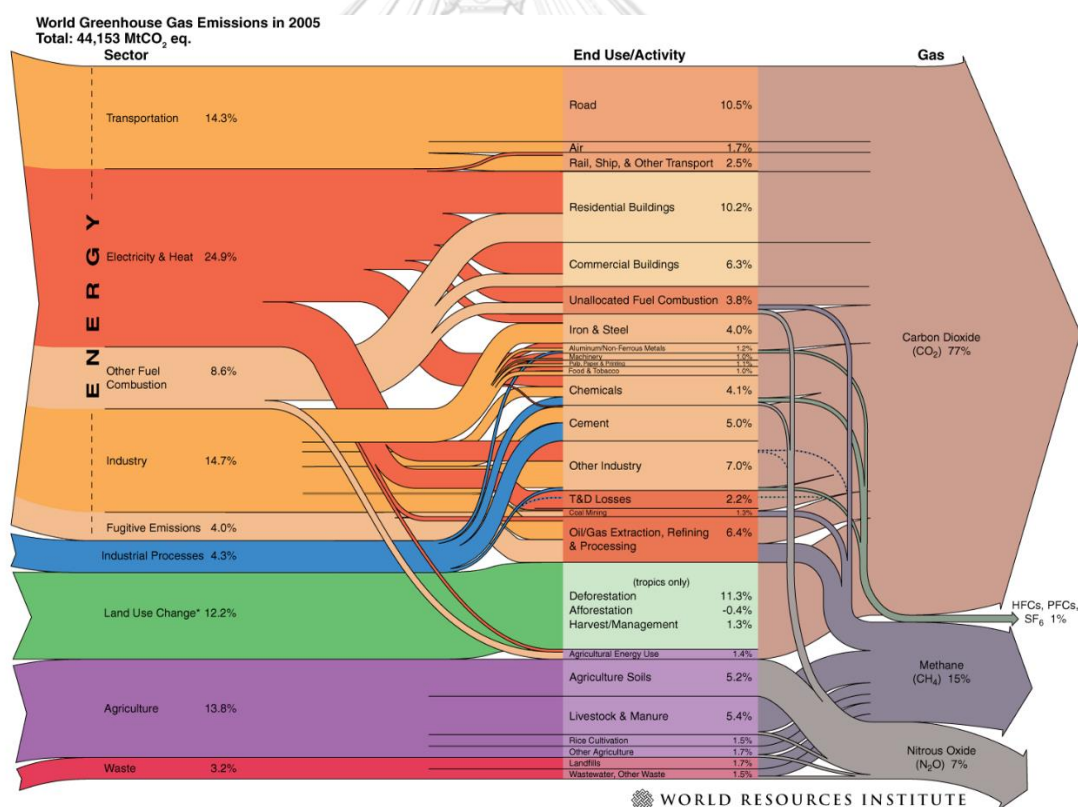
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมอร์ตาร์และคอนกรีตได้รับความนิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถหล่อขึ้นรูปแบบต่าง ๆ ได้ตามต้องการ นอกจากนั้นวัสดุก่อสร้างเหล่านี้มักจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และมวลรวมซึ่งมีราคาต่ำและสามารถจัดหาได้ง่าย อย่างไรก็ตามในแต่ละปีมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) จากกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement, OPC) ประมาณ 1,350 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 5-7 ของปริมาณการปล่อยก๊าซทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 1 (Hardjito et al., 2004) ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง ทำให้มีการศึกษาหาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 ปริมาณการปล่อย CO₂ และก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) ในแต่ละส่วนทั่วโลก (Baumert et al., 2005)

การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ดินขาว และตะกอนเตาถลุงเหล็ก ฯ เป็นหนึ่งในวิธีการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดย Metha (2002) ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยใช้แทนที่ OPC ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีความทนทานมากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ OPC ล้วน อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าลอยในลักษณะนี้ยังไม่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมด ต่อมาจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบหลักเนื่องจากมีซิลิกา และอลูมินา (Silica and alumina) จำนวนมากซึ่งเหมาะสมสำหรับการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์เช่นเดียวกับดินขาวเผา

จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและสารละลายต่างซึ่งมักจะเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งจากงานวิจัยของ Guo et al. (2010) พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยนั้น มีกำลังสูงถึง 63.4 เมกะปาสคาล เมื่ออบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิห้องต่ออีกเป็นเวลา 28 วัน วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค้นพบวัสดุที่สามารถมาใช้แทนที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

Nazari et al. (2014) ได้นำเสนอการใช้บอแรกซ์ (Borax) แทนที่สารละลายโซเดียมและเรียกวัสดุจีโอโพลิเมอร์ชนิดใหม่นี้ว่า “บอโรอลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์ (Boroaluminosilicate geopolymer, BASG)” ซึ่งโบรอนจะไปจับตัวกับออกซิเจนทำให้เกิดพันธะใหม่ (B-O bond) ในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้สารบอแรกซ์ส่งผลให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีสมบัติที่ด้อยลง ดังนั้นการพัฒนาสมบัติของ BASG จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

เนื่องจากการใส่สารละลายประเภทซิลิเกตที่ลดลงเนื่องจากการแทนที่ของบอแรกซ์ งานวิจัยนี้จึงศึกษาวัสดุที่สามารถนำมาพัฒนากำลังของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นได้ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Kaur et al. (2018) ได้ทำการทดสอบผสมเถ้าแกลบ (RHA) ลงในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งผลที่ได้พบว่า ค่ากำลังอัดสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เกิดขึ้นจากการที่ RHA ได้ถูกละลายโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไปช่วยในการยึดจับกันของอนุภาคต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ผสมบอแรกซ์

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณการใช้เถ้าแกลบต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ใช้บอแรกซ์แบบอบแห้ง (Anhydrous borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) และไม่อบแห้ง (Hydrated borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) แทนที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก
- 1.3.2 ใช้เถ้าแกลบเพิ่มที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6.0 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย
- 1.3.3 ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก
- 1.3.4 ใช้ทรายที่มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.58 เป็นมวลรวมละเอียด
- 1.3.5 ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์
- 1.3.6 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (เกรดทางการค้า) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O , H_2O และ SiO_2 เท่ากับ 14.5%, 55.3% และ 30.0% ตามลำดับ
- 1.3.7 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์
- 1.3.8 บ่มตัวอย่างที่ความร้อน 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 วัน
- 1.3.9 ใช้อัตราส่วน ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Borax}$)/ NaOH เท่ากับ 0.5, 0.75 และ 1 โดยน้ำหนัก
- 1.3.10 ใช้อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้น (Na_2SiO_3 , NaOH และบอแรกซ์) ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.6 โดยน้ำหนัก (Activators/fly ash = 0.6)
- 1.3.11 ทดสอบหาค่ากำลังอัด กำลังดัด การไหลแผ่ โพรง และการดูดซึมน้ำ หลังจากตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อใช้ในการอธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์และเถ้าแกลบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น
- 1.4.2 สามารถพัฒนาสมบัติของ BASG โดยใช้เถ้าแกลบได้

บทที่ 2

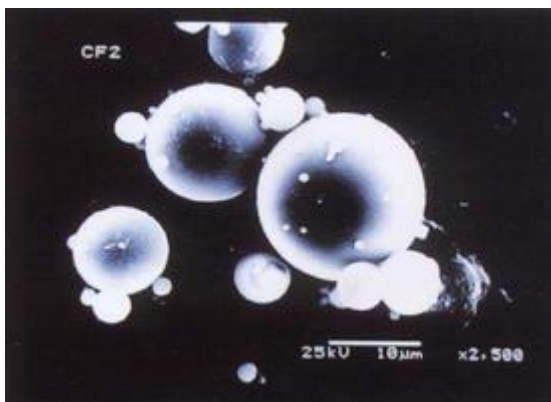
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นของแข็งที่อนุภาคละเอียดมาก เกิดจากการเผาถ่านหิน ในการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้า 2 ชนิดคือ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) และเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเถ้าลอยจะมีความเบากว่า โดยการที่จะนำเถ้าลอยมาใช้งานนั้น ต้องใช้วิธีการดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) รูปที่ 2 เป็นภาพการขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในแต่ละวันซึ่งมีปริมาณมาก ซึ่งขนาดของเถ้าลอยโดยปกติจะอยู่ที่ 1 ถึง 200 ไมโครเมตร (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553) ดังรูปที่ 3 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Fe_2O_3 เป็นหลัก ทั้งนี้เถ้าลอยเป็นปัญหามลพิษอย่างมาก ไม่เพียงแต่ต้องการพื้นที่สำหรับฝังกลบแต่ยังทำลายสภาพแวดล้อมรอบข้างอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันการผลิตเถ้าลอยในประเทศไทยมีอยู่ประมาณ 3 ล้านตันต่อปี จึงได้มีนักวิจัยพยายามจะนำมาพัฒนาเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์



รูปที่ 2 การขนส่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (จิรภัทร ขำญาติ, 2546)

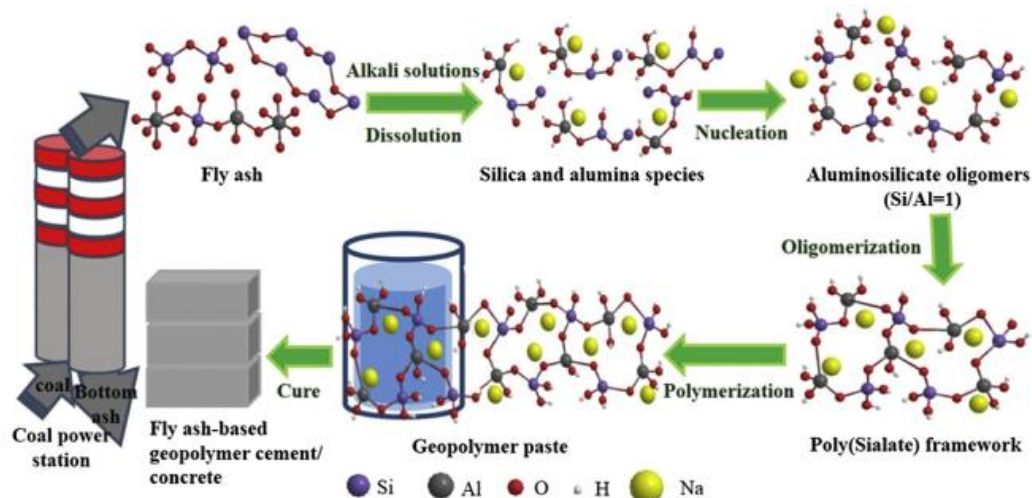


รูปที่ 3 รูปทรงเถ้าลอย ขนาด 10 ไมโครเมตร (จิรภัทร ขำญาติ, 2546)

โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยมีฤทธิ์เป็นด่าง เป็นวัสดุปอซโซลาน มีส่วนประกอบส่วนมากเป็นซิลิกา (Si) และ อลูมินา (Al) โดยลักษณะทั่วไปของเถ้าลอยมีความพรุน และพื้นที่หน้าตัดมาก ซึ่งช่วยในการดูดซับน้ำ ในงานวิจัยของ Ahmaruzzaman (2010) ยังได้พูดถึงการนำเอาเถ้าลอยที่เหลือจากกระบวนการการเผาต่าง ๆ ไปใช้ในกระบวนการการดูดซับมลพิษในงานต่าง ๆ อีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางน้ำ มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของน้ำมัน และอื่น ๆ อีกมาก ซึ่งผลพบว่าเถ้าลอยมีความสามารถได้การดูดซับได้พอสมควร

2.2 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากสารละลายต่างทำปฏิกิริยากับวัสดุประเภทอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate material) โดยจีโอโพลิเมอร์จะมีโครงสร้างอสังฐาน เป็น 3 มิติที่แข็งแรง ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อใส่สารละลายต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ลงไปในเถ้าลอย และใส่สารเร่งประเภทอัลคาไลซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือ โพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ทำให้เกิดการชะละลายของซิลิกาและอลูมินาออกจากผิวของเถ้าลอย และเกิดปฏิกิริยานิวเคลิเอชัน (Nucleation) ทำให้สารจับตัวกันเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ดังรูปที่ 4



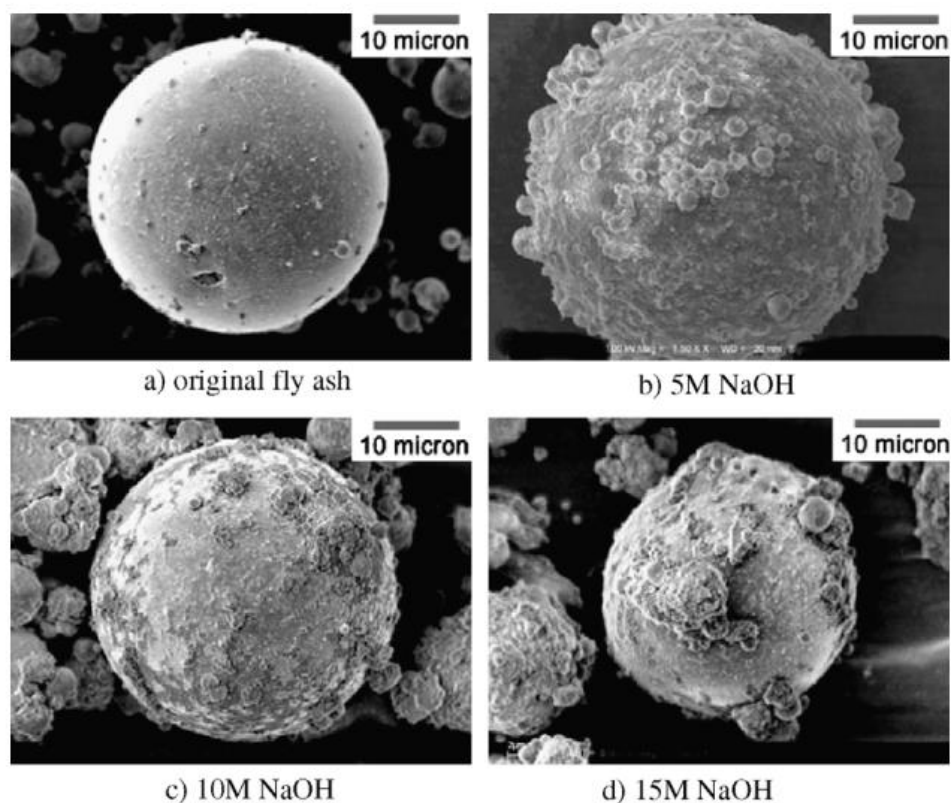
รูปที่ 4 กระบวนการการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Zhuang et al., 2016)

2.3 สารละลายต่าง

เนื่องจากในถ่านล่อยและสารตั้งต้น มีปริมาณซิลิกาและอลูมินาสูง ดังนั้นเมื่อถ่านล่อยและสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างจะทำให้เกิดการชะละลาย (Dissolution) ของซิลิกาและอลูมินาออกมาที่บริเวณผิว ซึ่งจะทำการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น โดยสารละลายต่างที่ใช้ส่วนมากจะเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และยังมีสารเร่งประเภทอัลคาไลซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

2.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, NH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้เพื่อชะละลายซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ออกจากผิวถ่านล่อย จากงานวิจัยของ ปริญา จินดาประเสริฐ และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) พบว่าความเข้มข้นของสารละลายต่างมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอย่างมาก โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสามารถเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยากับถ่านล่อยได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้ซิลิกาและอลูมินาถูกชะละลายออกมามากขึ้น

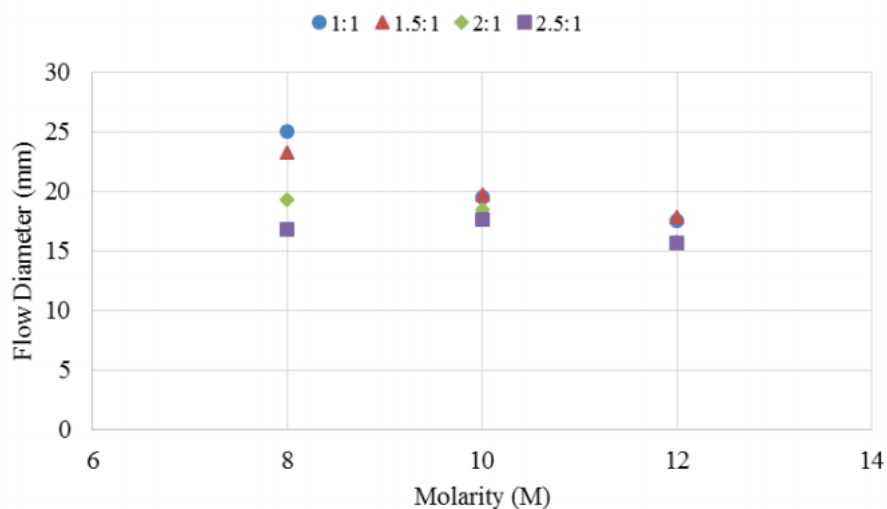


รูปที่ 5 ผิวของเถ้าลอยที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 10 นาที

(Ubolluk Rattanasak และ Prinya Chindapasirt, 2009)

งานวิจัยของ Malkawi et al. (2016) ได้ทำการทดสอบอิทธิพลของสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline solution) ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH มีอิทธิพลต่อความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ โดยปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการไหลได้ (Flowability) ลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของ NaOH ส่งผลให้ค่า pH ในส่วนผสมสูงขึ้น และยังส่งผลให้อัตราการละลาย (Dissolution rate) สูงขึ้นตามไปด้วย

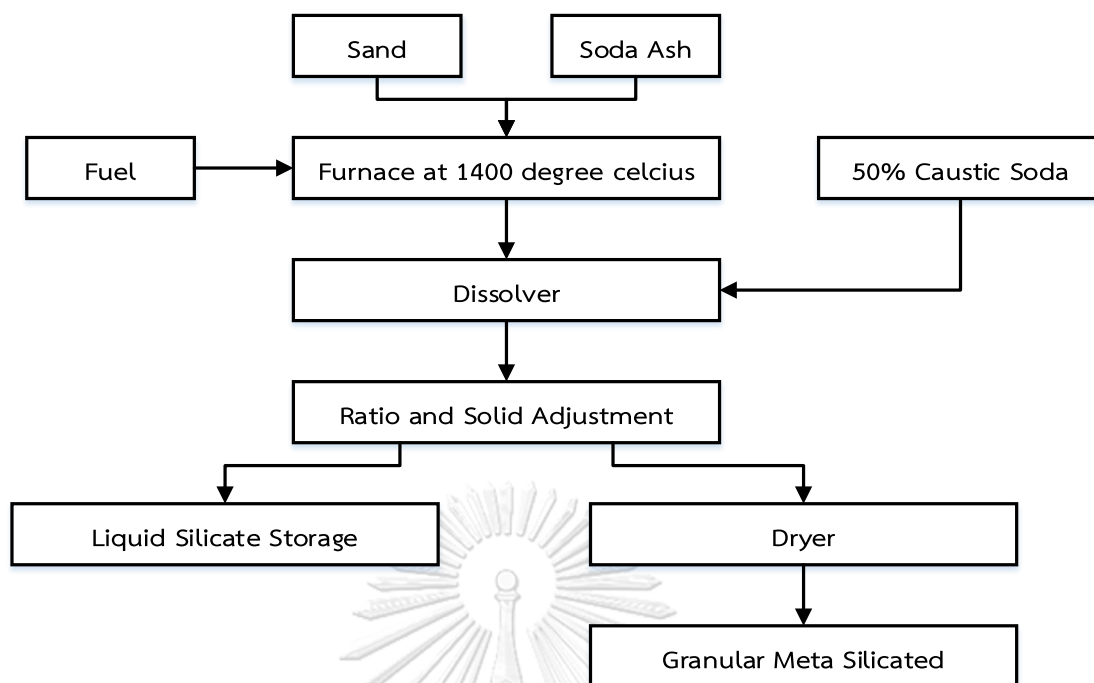
โดยจากรูปที่ 6 ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 และ NaOH พบว่า ความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ลดลง ทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้จากการทดสอบของ Malkawi et al. (2016) ยังให้ข้อสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของ Na_2SiO_3 ก็มีผลต่อความสามารถในการไหลเช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8 โมลาร์ และเพิ่มปริมาณ Na_2SiO_3 จากร้อยละ 50 เป็น 71 ผลที่ได้พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของการไหล (Flowing diameter) ลดลงถึงร้อยละ 33 นั่นจึงได้ข้อสรุปว่า ความเข้มข้นของ NaOH และ Na_2SiO_3 มีผลต่อความสามารถในการไหลได้ ตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 อิทธิพลของความเข้มข้น NaOH กับ อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 และ NaOH ต่อความสามารถในการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

2.3.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , NS)

ในปี 1818 Johann Nepomuk ทำการทดลองละลายซิลิกาออกจากแร่เฟลด์สปาร์ (Potash) ทำให้ค้นพบว่า โซเดียมซิลิเกตมีคุณสมบัติเป็นสารละลายซิลิกาได้ Johann Nepomuk จึงได้ตั้งชื่อใหม่ว่า แก้วเหลว (Waterglass) ในปัจจุบันกระบวนการการผลิตโซเดียมซิลิเกต ทำได้โดยการเผาทราย และ โซเดียมคาร์บอเนต ในอุณหภูมิที่ควบคุมประมาณ 1350 -1450 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 7 ทั้งนี้หลังจากการเผาไหม้จนละลายแล้วก็ทำการอัดแรงดัน และเก็บในรูปของของเหลวหรือแบบผง (Shi et al., 2006)



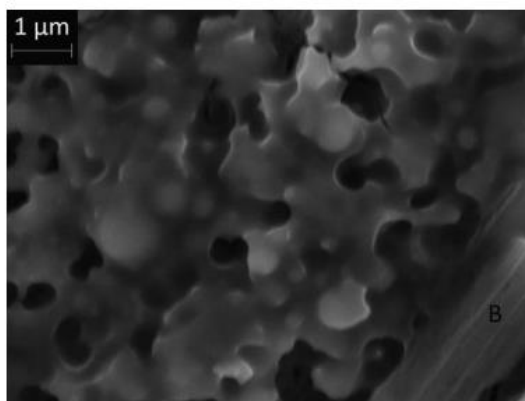
รูปที่ 7 กระบวนการการผลิตโซเดียมซิลิเกต (Shi et al., 2006)

2.4 การใช้งานบอแรกซ์ในอัลคาไลซีเมนต์

บอแรกซ์มีกระบวนการการผลิตมาจากการนำเอา ทินแคล (Tincal) ที่มีอนุภาคขนาดประมาณ 10 มิลลิเมตร ใส่ในเตาปฏิกรณ์ที่มีน้ำผสมอยู่อุณหภูมิกว่า 95 ถึง 100 องศาเซลเซียสของเหลวที่เกิดขึ้นหลังจากการผ่านอุณหภูมิสูงจะเกิดเป็น สารคอลลอยด์ ในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งจะมีสารบางส่วนที่เกิดการตกตะกอนลงมารวมตัวกันเป็นของแข็ง หลังจากการละลายและตกตะกอนเป็นที่เรียบร้อยแล้วสารจะถูกส่งไปยังเครื่องกรองและตกผลึกเป็นบอแรกซ์

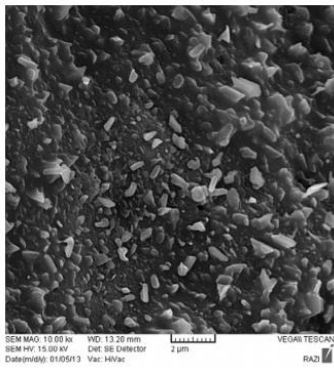
Williams and van Riessen (2011) ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ซึ่งคล้ายกับจีโอโพลิเมอร์โดยอาศัยโบรอนที่ได้จากบอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) แทนที่อลูมิเนียมในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ พวกเขาใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นแหล่งของ SiO_2 , บอแรกซ์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิต “Alkali activated borosilicate inorganic polymer (AABSIP)” พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้บอแรกซ์ทั่วไปและบอแรกซ์แบบอบแห้ง (Anhydrous borax) ที่ได้จากการอบบอแรกซ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ก่อนจะเพิ่มอุณหภูมิเป็น 300 องศาเซลเซียส และทำการอบต่อไปอีก 15 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่าโครงสร้างของ AABSIP มีลักษณะเป็นคล้ายแก้ว มีรูพรุนจำนวนมาก และยังมีซิลิกาฟุ่มและบอแรกซ์ (B)

บางส่วนที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาอีกด้วย ดังรูปที่ 8 นอกจากนั้นยังพบว่าการผสมบอแรกซ์แบบบอบแห้งสามารถผลิต AABSIP ที่มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 56 เมกะปาสคาล ได้ ซึ่งมีค่าสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้บอแรกซ์แบบไม่อบร้อยละ 24

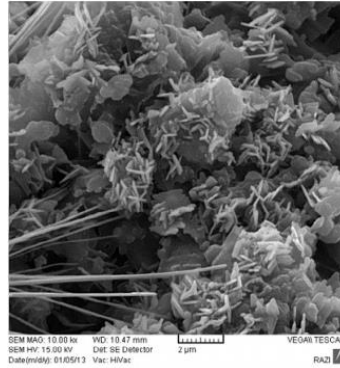


รูปที่ 8 Microstructure ของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบบอบแห้ง
(Williams & van Riessen, 2011)

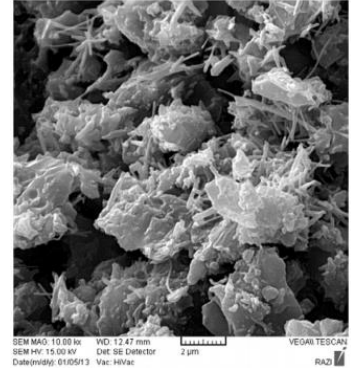
ต่อมา Nazari et al. (2014) ได้ทำการทดลองสังเคราะห์ BASG จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และบอแรกซ์แบบบอบแห้ง (Anhydrous borax) เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator, A) ผสมร่วมกับเถ้าลอย (FA) พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนบอแรกซ์/NaOH และ A/FA ที่ส่งผลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคและกำลังรับแรงของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการผสม NaOH และบอแรกซ์ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ BASG จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดที่ดีขึ้น ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคของ BASG ที่มีผิวขรุขระมากกว่าจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของ BASG ที่มากกว่าดังแสดงในรูปที่ 9 อย่างไรก็ตามโครงสร้างจุลภาคของ BASG แตกต่างจากอลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์ (Aluminosilicate Geopolymer, ASG) ที่พบรอยแตกร้าวเล็ก ๆ (Micro-crack) ดังแสดงในรูปที่ 10 ถึงแม้ว่าการปรากฏของรอยแตกจะไม่สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุได้อย่างชัดเจน แต่กลับบ่งบอกถึงพฤติกรรมที่แตกต่างในระหว่างที่เกิดการขยายตัวของรอยแตกร้าวในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ทั้งสองประเภทได้ สำหรับ ASG รอยแตกร้าวเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นอาจส่งผลต่อการกระจายแรงที่ต่อนการวิบัติ ในขณะที่โครงสร้างที่ขรุขระและแทบจะไม่พบรอยแตกระดับไมโครเมตรซึ่งพบใน BASG บ่งบอกถึงการวิบัติแบบทันทีทันใด (มากกว่าวัสดุซีเมนต์ทั่วไป) (Bagheri et al., 2018)



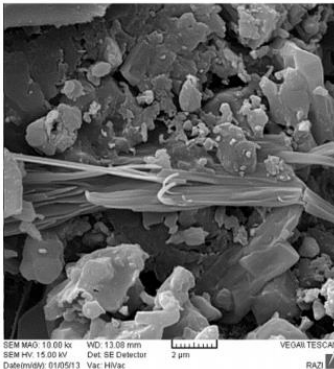
A/FA = 0.75
Borax = 366 kg / m³



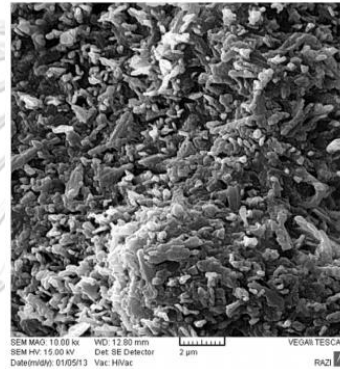
A/FA = 0.85
Borax = 393 kg / m³



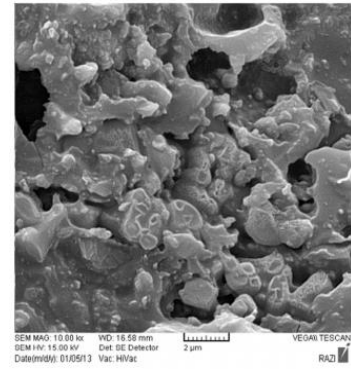
A/FA = 0.75
Borax = 434 kg / m³



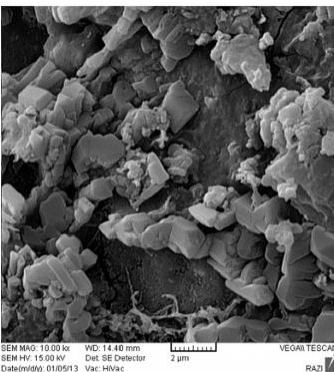
A/FA = 0.90
Borax = 448 kg / m³



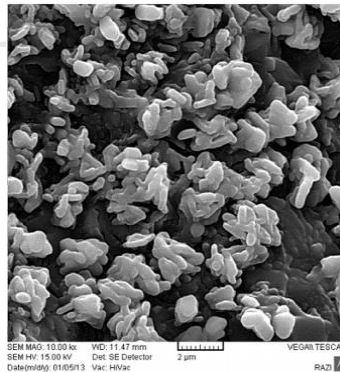
A/FA = 0.85
Borax = 471 kg / m³



A/FA = 0.90
Borax = 486 kg / m³

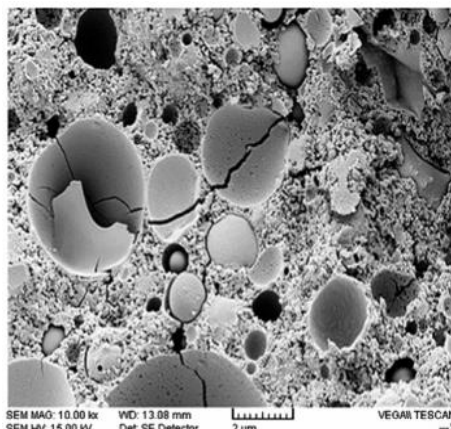


A/FA = 0.85
Borax = 503 kg / m³



A/FA = 0.90
Borax = 519 kg / m³

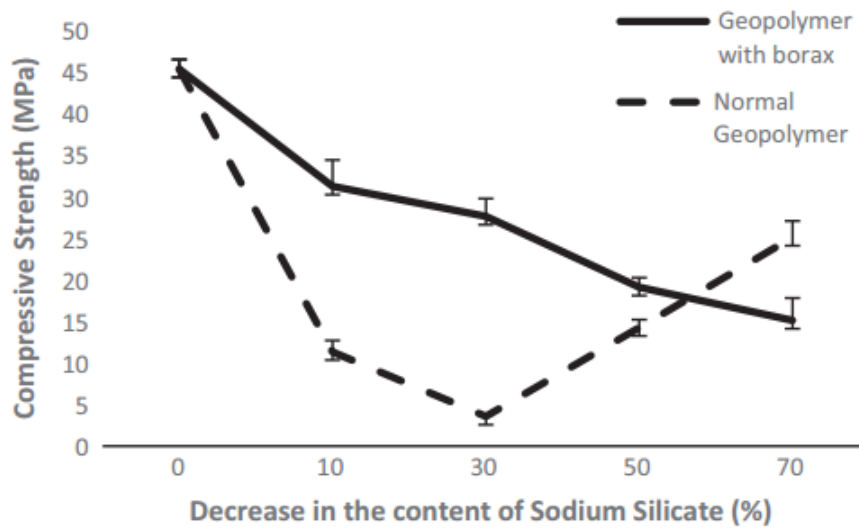
รูปที่ 9 Microstructure ของ Boroaluminosilicate Geopolymer (Nazari et al., 2014)



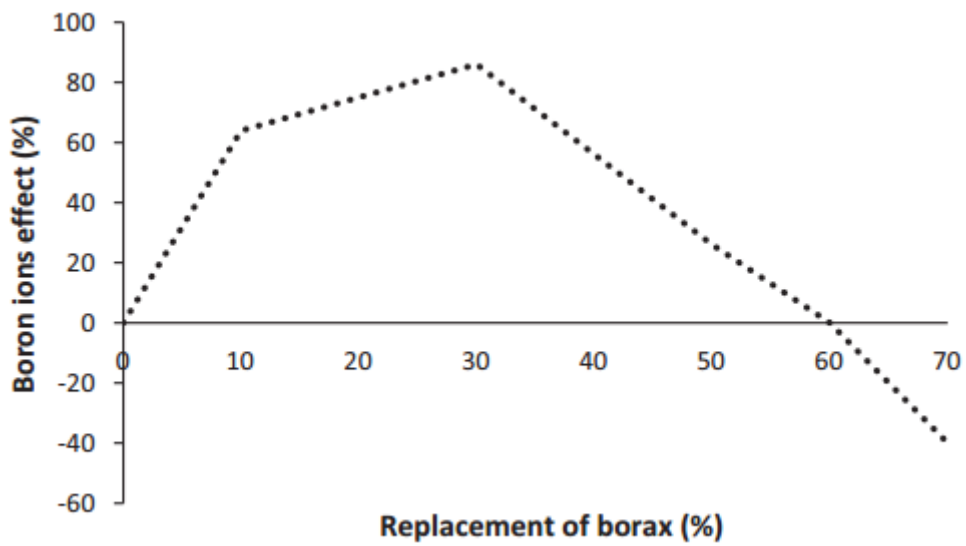
รูปที่ 10 Microstructure ของ Aluminosilicate Geopolymer (Nazari et al., 2014)

ในงานวิจัยของ Ali. Bagheri et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้บอแรกซ์ที่ส่งผลต่อสมบัติจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ โซเดียมซิลิเกต (NS) โซเดียมไฮดรอกไซด์ และบอแรกซ์ (Anhydrous borax) จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าการใช้บอแรกซ์แทนที่ NS ส่งผลให้ส่วนจีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผสมบอแรกซ์ในปริมาณที่มากขึ้น (เส้นทึบ) อย่างไรก็ตามการผสมบอแรกซ์ไม่เกินร้อยละ 60 ส่งผลดีต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุมากกว่า ส่วนผสมที่ลดการใช้โซเดียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียว (เส้นประ) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้บอแรกซ์แทนที่โซเดียมซิลิเกตร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่ใส่บอแรกซ์ (รูปที่ 12)

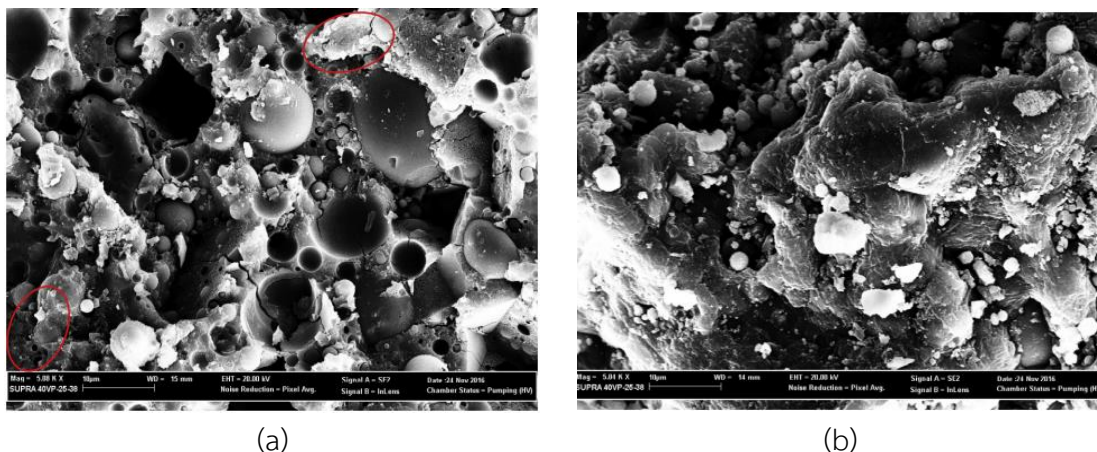
จากรูปที่ 13a จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของอลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (ยกเว้นจุดที่อยู่ในบริเวณวงกลมสีแดง) นอกจากนี้ยังมีอนุภาคของเถ้าลอยที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาซึ่งทำหน้าที่ขัดขวางการขยายตัวของรอยแตกจ้าวเล็ก ๆ (Micro-cracks) ที่เกิดขึ้นในวัสดุ ในขณะที่ BASG ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 50 จะมีลักษณะกึ่งผลึกที่มีรอยแตกละเอียดกว่า (รูปที่ 13b) พวกเขาเชื่อว่าโครงสร้างในลักษณะนี้จะดูดซับพลังงานได้น้อย (เปราะ) และเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Nazari et al., 2014)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละของโซเดียมซิลิเกตที่ลดลง (Ali. Bagheri et al., 2017)



รูปที่ 12 ผลกระทบจากการเพิ่มปริมาณบอแรกซ์ (Ali. Bagheri et al., 2017)

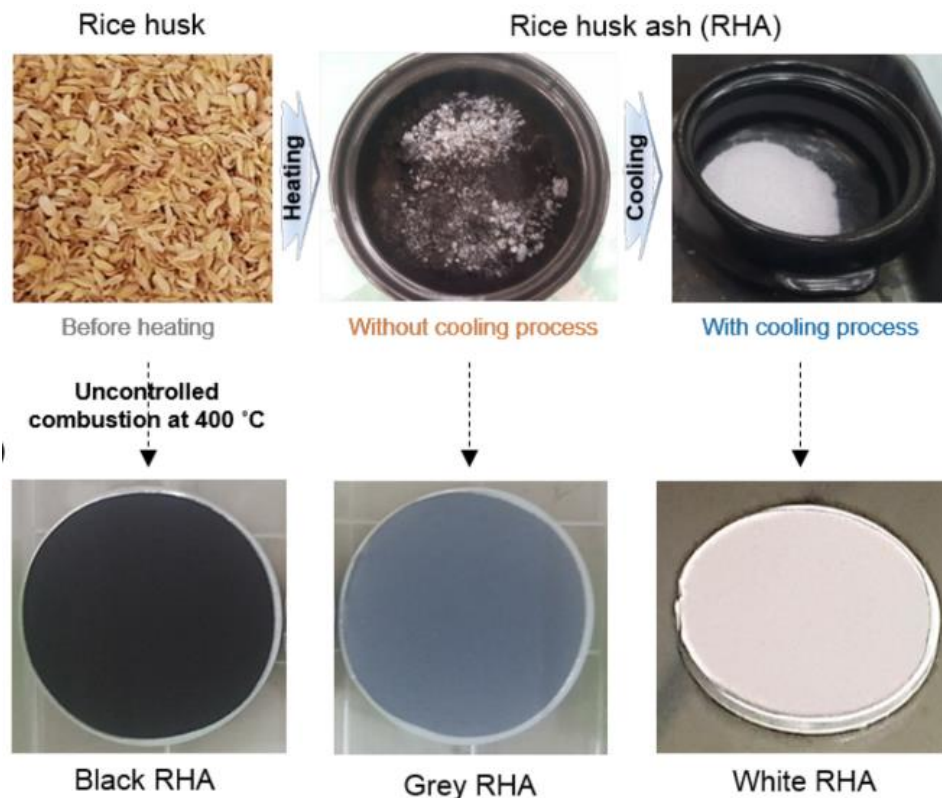


รูปที่ 13 ผลจากการทดสอบ SEM ของตัวอย่างที่ไม่มีบอแรกซ์ (a) และตัวอย่างที่มีบอแรกซ์ (b)

(Ali. Bagheri et al., 2017)

2.5 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

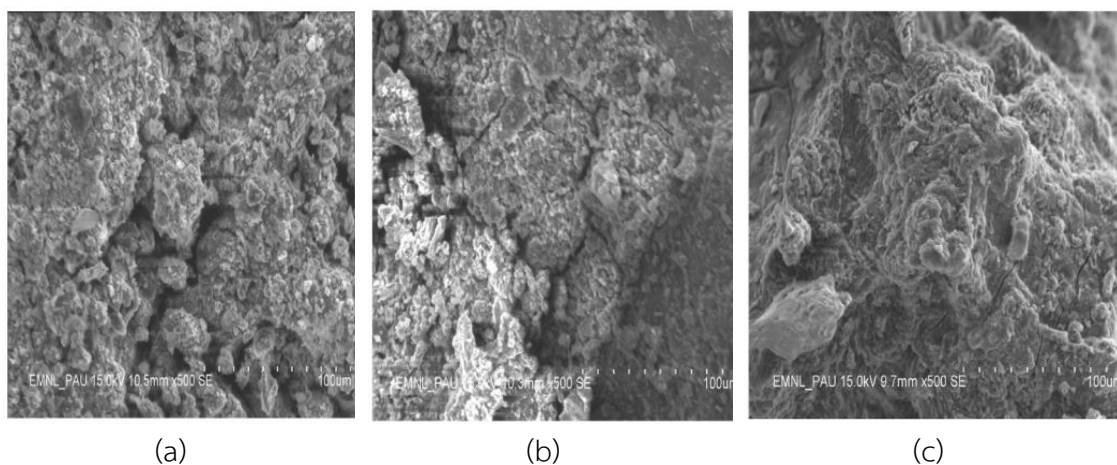
แกลบเป็นส่วนหนึ่งของเปลือกข้าว เป็นส่วนของเมล็ด หาง และขี้เมล็ด ในปัจจุบันข้าวถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญมากในประเทศไทย ซึ่งในปี 2561 ที่ผ่านมามีการส่งออกธัญพืชมากกว่า 8.74 ล้านตัน (กระทรวงพาณิชย์ กรมการค้าต่างประเทศ, 2561) ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก ซึ่งแกลบคิดเป็นอัตราส่วนประมาณร้อยละ 23 ของข้าวทั้งหมด โดยทั่วไปแกลบมักจะถูกนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานทดแทน ทั้งในส่วนของพลังงานน้ำมัน พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีจำนวนมาก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แกลบถือเป็นเชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักเบา การเผาแกลบจำเป็นต้องใช้อากาศและอุณหภูมิที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิและอากาศไม่เพียงพอจะทำให้แกลบเป็นสีดำ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีปริมาณคาร์บอน (Carbon) เหลืออยู่มาก ไม่เหมาะในการนำมาใช้ (Xu et al., 2012; ปริญา จินดาประเสริฐ และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552) ผลของการควบคุมอุณหภูมิในการเผาแกลบเป็นดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลจากการควบคุมอุณหภูมิในการเผาแกลบ (Kang et al., 2019)

ผลการทดสอบของ Kang et al. (2019) พบว่าในอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ผลผลิตที่ได้จะเป็นแกลบที่มีสีขาว ไม่มีคาร์บอนผสม องค์ประกอบทางเคมีของแกลบส่วนมากประมาณร้อยละ 85-98 จะเป็นซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญาจินดาประเสริฐ, 2552) ซึ่งก็คือ แกลบเป็นแหล่งที่มีซิลิกาสูง จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเอาแกลบไปใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์

ในงานวิจัยของ Kaur et al. (2018) ได้ทำการทดลองใช้แกลบในการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยทำการปรับค่าอัตราส่วนของแกลบ (RHA) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\frac{\text{RHA}}{\text{NaOH}}$) ไปเรื่อย ๆ โดยผลที่ได้พบว่ายี่อัตราส่วนมากขึ้น ยิ่งส่งผลให้กำลังสูงขึ้นไปด้วย ทั้งนี้จากผลที่ได้ยังพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำลังสูงมาก เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปช่วยละลายเอาซิลิกาในแกลบออกมาเพื่อจับกันเป็นพันธะที่แข็งแรงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลการทดสอบ SEM เปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของ NaOH ที่ 12M (a), 14M (b) และ 16M (c) (Kaur et al., 2018)



บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 คือ การศึกษาอิทธิพลของการอัตราส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกตและบอแรกซ์ (NS+B) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ในขณะที่ส่วนที่ 2 เป็นการใช้ถ้ำกลบในการเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุประเภทบอโรลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์ (Boroaluminosilicate geopolymer, BASG)

3.1.1 สัดส่วนผสมสำหรับการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน (NS+B)/NH ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 1 และ 2 แสดงส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาที่ใช้ผงบอแรกซ์ชนิดไม่บดหั่นและอบแห้งตามลำดับ โดยใช้ผงบอแรกซ์แทนที่ NS ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วน (NS+B)/NH เท่ากับ 0.5, 0.75 และ 1 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนระหว่าง Activator (โซเดียมซิลิเกต + บอแรกซ์ + โซเดียมไฮดรอกไซด์) ต่อ ถ้ำลอย ที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 0.6

จากตารางที่ 1 และ 2 สามารถคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างอิงจากงานวิจัยของ Turner and Collins (2013) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตโซเดียมซิลิเกต (NS) โดยกระบวนการผลิต NS ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1.51 kg CO₂-e/kg ในขณะที่บอแรกซ์ปล่อยเพียง 1.36 kg CO₂-e/kg (An & Xue, 2014)

จากการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากส่วนผสมพบว่าเมื่อลดปริมาณ NS และแทนที่ด้วยบอแรกซ์ร้อยละ 10 20 และ 30 สามารถลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่ผสมบอแรกซ์ พบว่าที่ส่วนผสม 1-NB0 0.75-NB0 และ 0.5-NB0 เมื่อลดปริมาณ NS ลงสามารถลดปริมาณ CO₂ ที่ปล่อยออกมาถึงร้อยละ 14.54 และ 33.26 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน (NS+B)/NH ที่ส่งผลต่อสมบัติของ BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง

ส่วนผสม	(NS+B)/NH	ถ้ำลอย (g)	ทราย (g)	บอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง (g)	NS (g)	NH (g)	CO ₂ emission (kg CO ₂ -e)
1-NB0	1	100	275	0	30	30	0.0454
1-NB10	1	100	275	3	27	30	0.0449
1-NB20	1	100	275	6	24	30	0.0445
1-NB30	1	100	275	9	21	30	0.0440
0.75-NB0	0.75	100	275	0	25.71	34.29	0.0388
0.75-NB10	0.75	100	275	2.57	23.14	34.29	0.0384
0.75-NB20	0.75	100	275	5.14	20.57	34.29	0.0381
0.75-NB30	0.75	100	275	7.71	18	34.29	0.0377
0.5-NB0	0.5	100	275	0	20	40	0.0303
0.5-NB10	0.5	100	275	2	18	40	0.0300
0.5-NB20	0.5	100	275	4	16	40	0.0296
0.5-NB30	0.5	100	275	6	14	40	0.0293

หมายเหตุ 1-NB20 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน (NS+B)/NH เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก และใช้บอแรกซ์แบบไม่อบแห้งแทนที่ NS ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน (NS+B)/NH ที่ส่งผลต่อสมบัติของ BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบอบแห้ง

ส่วนผสม	(NS+B)/NH	ถ้วยล้อย (g)	ทราย (g)	บอแรกซ์แบบอบแห้ง (g)	NS (g)	NH (g)	CO ₂ emission (kg CO ₂ -e)
1-AB0	1	100	275	0	30	30	0.0454
1-AB10	1	100	275	3	27	30	0.0449
1-AB20	1	100	275	6	24	30	0.0445
1-AB30	1	100	275	9	21	30	0.0440
0.75-AB0	0.75	100	275	0	25.71	34.29	0.0388
0.75-AB10	0.75	100	275	2.57	23.14	34.29	0.0384
0.75-AB20	0.75	100	275	5.14	20.57	34.29	0.0381
0.75-AB30	0.75	100	275	7.71	18	34.29	0.0377
0.5-AB0	0.5	100	275	0	20	40	0.0303
0.5-AB10	0.5	100	275	2	18	40	0.0300
0.5-AB20	0.5	100	275	4	16	40	0.0296
0.5-AB30	0.5	100	275	6	14	40	0.0293

หมายเหตุ 1-AB20 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน (NS+B)/NH เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก และใช้บอแรกซ์แบบอบแห้งแทนที่ NS ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

3.1.2 สัดส่วนผสมสำหรับการศึกษาสมบัติของ BASG ที่ผสมเถ้าแกลบ

การใช้บอแรกซ์ทำให้จีโอโพลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามจากการใช้บอแรกซ์อาจทำให้กำลังของจีโอโพลิเมอร์ลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำเถ้าแกลบมาช่วยเพิ่มกำลังให้กับ BASG โดยใช้เถ้าแกลบร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย เนื่องจากสามารถมีความเข้มข้นของซิลิกาเทียบเท่ากับซิลิกาฟูมร้อยละ 3, 4 และ 5 ตารางที่ 3 และ 4 แสดงสัดส่วนที่ใช้ในการศึกษาสำหรับ BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้งและอบแห้งตามลำดับ



ตารางที่ 3 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณเถ้าแคลเซียมที่เหมาะสมใน BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง

ส่วนผสม	(NS+B)/NH	เถ้าลอย (g)	ทราย (g)	บอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง (g)	NS (g)	NH (g)	เถ้าแคล (g)
0.5-B0RHA3.6	0.5	100	275	0	20	40	3.6
0.5-B10RHA3.6	0.5	100	275	2	18	40	3.6
0.5-B20RHA3.6	0.5	100	275	4	16	40	3.6
0.5-B30RHA3.6	0.5	100	275	6	14	40	3.6
0.5-B0RHA4.8	0.5	100	275	0	20	40	4.8
0.5-B10RHA4.8	0.5	100	275	2	18	40	4.8
0.5-B20RHA4.8	0.5	100	275	4	16	40	4.8
0.5-B30RHA4.8	0.5	100	275	6	14	40	4.8
0.5-B0RHA6	0.5	100	275	0	20	40	6.0
0.5-B10RHA6	0.5	100	275	2	18	40	6.0
0.5-B20RHA6	0.5	100	275	4	16	40	6.0
0.5-B30RHA6	0.5	100	275	6	14	40	6.0

หมายเหตุ 0.5-B10RHA3.6 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน (NS+B)/NH เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก, ใช้บอแรกซ์ไม่อบแห้งแทนที่ NS ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และผสม

เถ้าแคลร้อยละ 3.6 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย

ตารางที่ 4 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณเถ้ากลบที่เหมาะสมใน BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบอบแห้ง

ส่วนผสม	(NS+B)/NH	เถ้าลอย (g)	ทราย (g)	บอแรกซ์แบบอบแห้ง (g)	NS (g)	NH (g)	เถ้ากลบ (g)
0.5-AB0RHA3.6	0.5	100	275	0	20	40	3.6
0.5-AB10RHA3.6	0.5	100	275	2	18	40	3.6
0.5-AB20RHA3.6	0.5	100	275	4	16	40	3.6
0.5-AB30RHA3.6	0.5	100	275	6	14	40	3.6
0.5-AB0RHA4.8	0.5	100	275	0	20	40	4.8
0.5-AB10RHA4.8	0.5	100	275	2	18	40	4.8
0.5-AB20RHA4.8	0.5	100	275	4	16	40	4.8
0.5-AB30RHA4.8	0.5	100	275	6	14	40	4.8
0.5-AB0RHA6	0.5	100	275	0	20	40	6.0
0.5-AB10RHA6	0.5	100	275	2	18	40	6.0
0.5-AB20RHA6	0.5	100	275	4	16	40	6.0
0.5-AB30RHA6	0.5	100	275	6	14	40	6.0

หมายเหตุ 0.5-AB10RHA3.6 คือ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน (NS+B)/NH เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก, ใช้บอแรกซ์อบแห้งแทนที่ NS ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และผสมเถ้ากลบร้อยละ 3.6 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย

3.2 ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ ปริญา จินดาประเสริฐ (2553) โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: คลุกเคล้าเถ้าลอยร่วมกับเถ้าแกลบให้เข้ากันดีก่อนผสมร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงใน โม่ ผสมเป็นเวลา 5 นาที ในขณะที่ผสมอยู่ 5 นาที ให้สังเกตตามผิวของโม่ผสม เพื่อ สังเกตว่ามีส่วนผสมติดค้างหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่หรือไม่ หากพบเห็นให้ใช้ใบพาย (Spatula) ปาดให้เข้าส่วนผสมเข้ากันดี

ขั้นตอนที่ 2: หลังจาก 5 นาที ทำการผสมทรายที่ซั่งไว้ลงไป

ขั้นตอนที่ 3: หลังจากผ่านไป 10 นาที ทำการผสมโซเดียมซิลิเกตและบอแรกซ์ลงไป แล้วทำการผสม ต่อ 5 นาที

ขั้นตอนที่ 4: หลังจากทำ 3 ขั้นตอนแรกเสร็จเป็นเวลา 15 นาที นำเอาตัวอย่างที่ผสมแล้ว ตักใส่แบบ หล่อให้เรียบร้อย โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น ใส่ชั้นแรก แล้วทำการกระทุ้งแน่น

ขั้นตอนที่ 5: ทำการห่อแม่พิมพ์ด้วยพลาสติก แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 6: หลังจากอบเป็นเวลา 1 วันนำออกมาจากตู้อบ ทำการแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุครบ 7 วันแล้วจึงนำไปทดสอบ

3.3 รายละเอียดการทดสอบต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้บอแรกซ์แทนที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อ สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และศึกษาผลกระทบการใช้เถ้าแกลบในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสม บอแรกซ์ โดยการทดสอบจะทำการวัดค่าการไหลแผ่ (Mortar flow) เพื่อประเมินความสามารถใน การทำงานได้ (Workability) พร้อมทั้งหาค่าคุณสมบัติทางกลได้แก่ กำลังอัด (Compressive strength) กำลังดัด (Flexural strength) และ ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโดยเทคนิค การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence, XRF) วิธีเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD) และ การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

นอกจากนั้นยังศึกษาปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งเป็นไปตาม มาตรฐาน ASTM C642 (1997) มีวิธีการทดสอบคือ นำตัวอย่างไปอบแห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 24

ชั่วโมงแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก (a) จากนั้นนำไปแช่น้ำไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง นำขึ้นมาเช็ดให้ผิวแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) (b) จากนั้นนำตัวอย่างไปต้มในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำขึ้นมาเช็ดและชั่งน้ำหนักในอากาศ (c) และ ชั่งน้ำหนักในน้ำ (d) ค่าปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\text{Absorption after immersion (\%)} = \left[\frac{b-a}{a} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Volume of permeable pore space (\%)} = \left[\frac{c-a}{c-d} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

ตารางที่ 5 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ทดสอบ

สมบัติที่ทดสอบ	ลักษณะและขนาดของตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	มาตรฐานในการทดสอบ
ค่าการไหลผ่าน	-	-	ASTM C1437 (2015)
ค่ากำลังอัด	ลูกบาศก์ขนาด 5 ซม.	3 ตัวอย่าง	ASTM C109 (2016)
ค่ากำลังตัด	คานหน้าตัด 4x4 ซม. ความยาว 16 ซม.	3 ตัวอย่าง	ASTM C348 (2019)
โพรง	ลูกบาศก์ขนาด 5 ซม.	3 ตัวอย่าง	ASTM C642 (2013)
การดูดซึมน้ำ	ลูกบาศก์ขนาด 5 ซม.	3 ตัวอย่าง	ASTM C642 (2013)

3.4 การวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลโดยเริ่มจาก ทดสอบส่วนผสมที่ใช้บอแรกซ์เพิ่มแทนโซเดียมซิลิเกตโดยน้ำหนักต่าง ๆ และวิเคราะห์ผลค่าการไหลผ่าน และกำลังอัดของแต่ละส่วนผสม จากนั้นทำการคัดเลือกส่วนผสมที่ใช้บอแรกซ์ทดแทนที่มีค่าการไหลผ่าน และกำลังอัดเหมาะสมที่สุดนำมาเสริมกำลังโดยเพิ่มแก้วกลบเข้าไปโดยน้ำหนักของแก้วลอย จากนั้นทำการเปรียบเทียบปริมาณ

เก้าอี้ที่เหมาะสมและได้กำลังอัดสูงสุด พร้อมเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ระหว่าง
บอโรลูมิเนียมซิลิเกตที่ใช้บอแรกซ์แบบอบแห้งและไม่อบแห้ง

จากนั้นทำการวิเคราะห์และสรุปผลอัตราส่วนผสมของบอโรลูมิเนียมซิลิเกตที่ใส่เก้าอี้ที่เหมาะสม



บทที่ 4

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.1.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโดยวิธีเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ X-ray fluorescence (XRF)

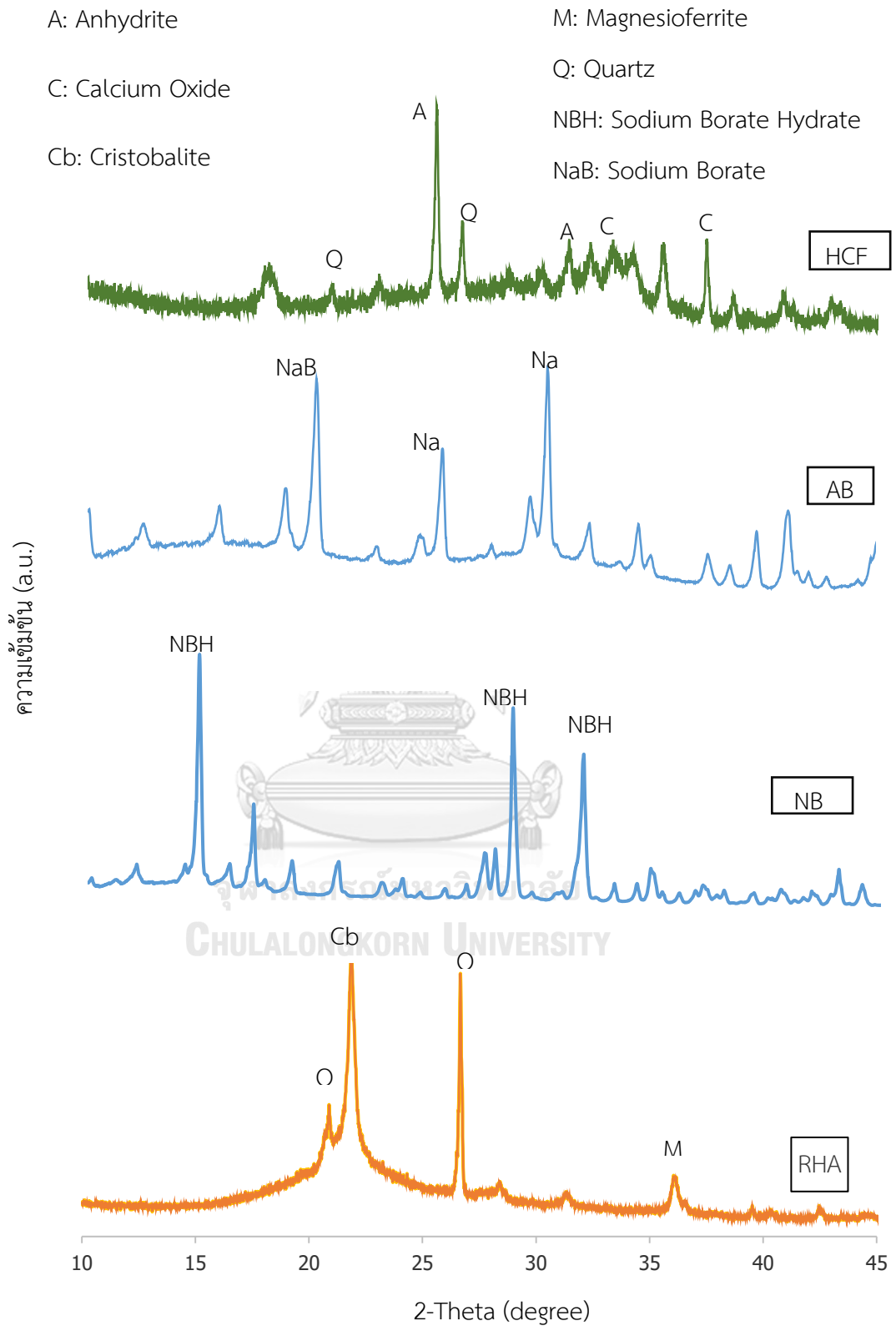
จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยวิธีเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ผลที่ได้พบว่า เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบหลักตามตารางที่ 6 เป็น SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ที่ร้อยละ 42.38, 21.31 และ 13.19 ตามลำดับซึ่งเป็นธาตุที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชัน เช่นเดียวกับ เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมี SiO_2 ร้อยละ 88.70 ซึ่งสามารถนำมาพัฒนากำลังของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ตามทฤษฎี

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง (HCF) และ เถ้าแกลบ

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	เถ้าลอย	เถ้าแกลบ
CaO	15.70	0.67
SiO_2	42.38	88.70
Al_2O_3	21.31	0.67
SO_3	-	0.31
Fe_2O_3	13.19	1.13
MgO	2.27	0.53
K_2O	1.98	2.41
TiO_2	0.46	0.06
Na_2O	0.86	0.09
P_2O_5	0.18	1.07
MnO	0.10	0.17
ZnO	0.20	0.02
Cl	-	0.51

4.1.2 ผลการทดสอบโดยวิธีเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD)

ผลการทดสอบด้วยวิธีเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) แสดงดังรูปที่ 16 พบว่าเถ้าลอย แคลเซียมสูง (High Calcium Fly ash, HCF) ที่ใช้ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแอนไฮไดรต์ (Anhydrite, A) หรือ แคลเซียมซัลเฟต (Anhydrous Calcium Sulfate, CaSO_4) และควอตซ์ (Quartz, Q) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกา (Silica) มาก จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบของบอแรกซ์แบบอบแห้ง (Anhydrous Borax, AB) พบว่ามีความเข้มข้นของโซเดียมบอเรต (Sodium Borate, NaB) สูงมากอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ของบอแรกซ์แบบไม่อบ (Hydrated Borax, NB) ซึ่งมีความเข้มข้นของโซเดียมบอเรตไฮเดรต (Sodium Borate Hydrate, NaBH) สูงมากเช่นกัน ในส่วนของผลการทดสอบเถ้าแกลบ (RHA) นั้น พบว่ามีความเข้มข้นของควอตซ์ (Quartz, Q) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกาสูงมากอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันพบว่า เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของบอแรกซ์แบบอบแห้ง (AB) และ บอแรกซ์แบบไม่อบ (NB) พบว่าแนวโน้มของกราฟของบอแรกซ์แบบอบแห้งสูงชันกว่าบอแรกซ์แบบไม่อบ ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าบอแรกซ์แบบอบแห้งสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า



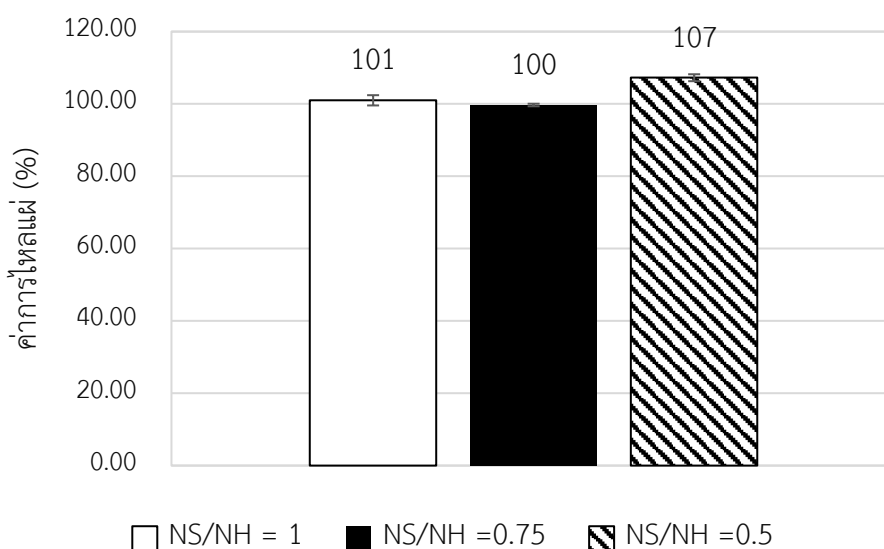
รูปที่ 16 ผลการทดสอบ XRD ของ เถ้าลอย (HCF), บอแรกซ์แบบอบแห้ง (AB), บอแรกซ์ (NB) และ เถ้าแกลบ (RHA)

4.2 ผลการทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

4.2.1 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1) ความสามารถในการไหลแผ่ (Flowability)

จากผลการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM C1473 (2015) ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ไม่ผสมบอแรกซ์) ที่มีอัตราส่วนผสม NS/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบที่ได้พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน NS/NH ที่สูงกว่าจะได้ค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malkawi et al. (2016) ที่พบว่าเมื่อปริมาณของโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการไหลแผ่ลดลงตามไปด้วย เนื่องจาก NS มีความเป็นเจลสูงเมื่อลดปริมาณลงจึงส่งผลให้การไหลแผ่ดีขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ไม่ผสมบอแรกซ์) ที่มีอัตราส่วนผสม NS/NH เท่ากับ 0.5 ให้ค่าการไหลแผ่มากที่สุดที่เท่ากับ 107% โดยเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (1-NBO) ถึงร้อยละ 7

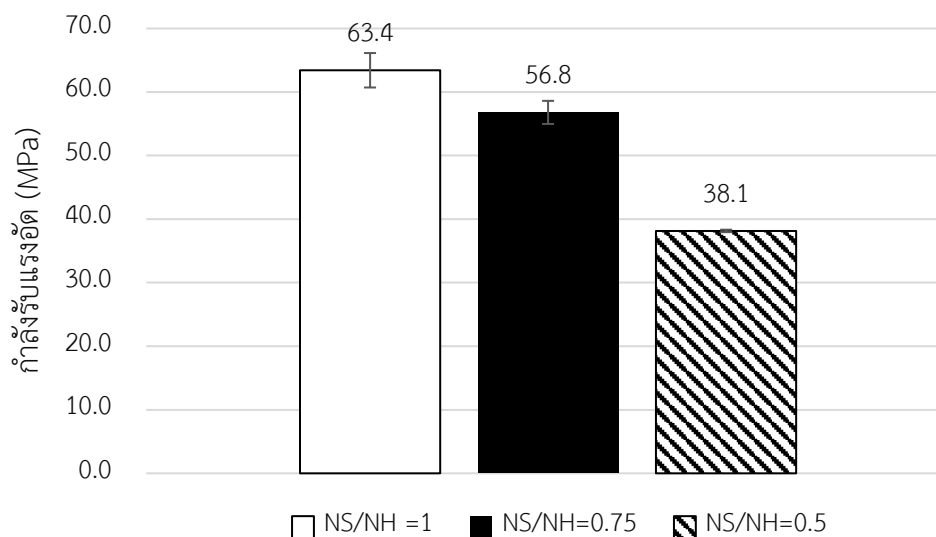


รูปที่ 17 ความสามารถในการไหลแผ่ (Flowability) ของส่วนผสมที่มีอัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 โดยน้ำหนัก

2) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 18 จากผลที่ได้พบว่าปริมาณโซเดียมซิลิเกตส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง โดยตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ลดปริมาณการใช้โซเดียมซิลิเกตลงมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละ 10.41 และ 39.91

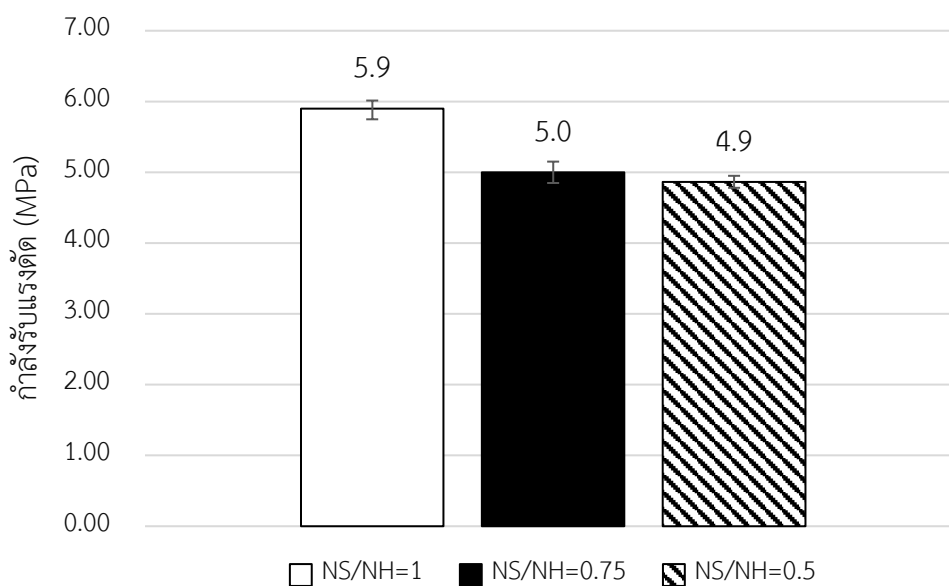
เมื่อใช้อัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เกิดจากการที่ซิลิกาและอลูมินาทำปฏิกิริยายึดเหนี่ยวกันเป็นโครงสร้างอสังฐาน เมื่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ถูกลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตลงส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความยึดเหนี่ยวกันน้อยลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามลำดับ



รูปที่ 18 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสม NS/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ

3) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C348 (2019) ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แสดงในรูปที่ 19 ผลที่ได้พบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยค่ากำลังรับแรงดัดลดลงที่ร้อยละ 15.3 และ 17.5 ตามลำดับ เมื่อลดอัตราส่วน NS/NH จาก 1.0 เป็น 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลกำลังรับแรงอัด เนื่องจากโซเดียมซิลิเกต (NS) เป็นแหล่งซิลิกาที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์อย่างมาก เมื่อตัวอย่างถูกลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตลงทำให้ปริมาณซิลิกาหลงตามไปด้วย ส่งผลให้พันธะ Si-O-Si ถูกลดลง

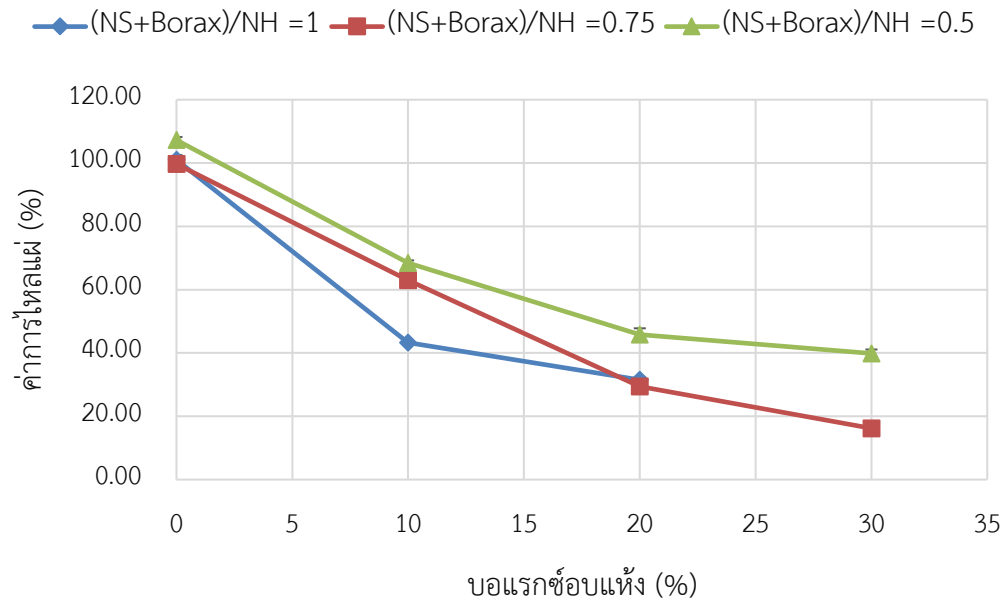


รูปที่ 19 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสม NS/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ

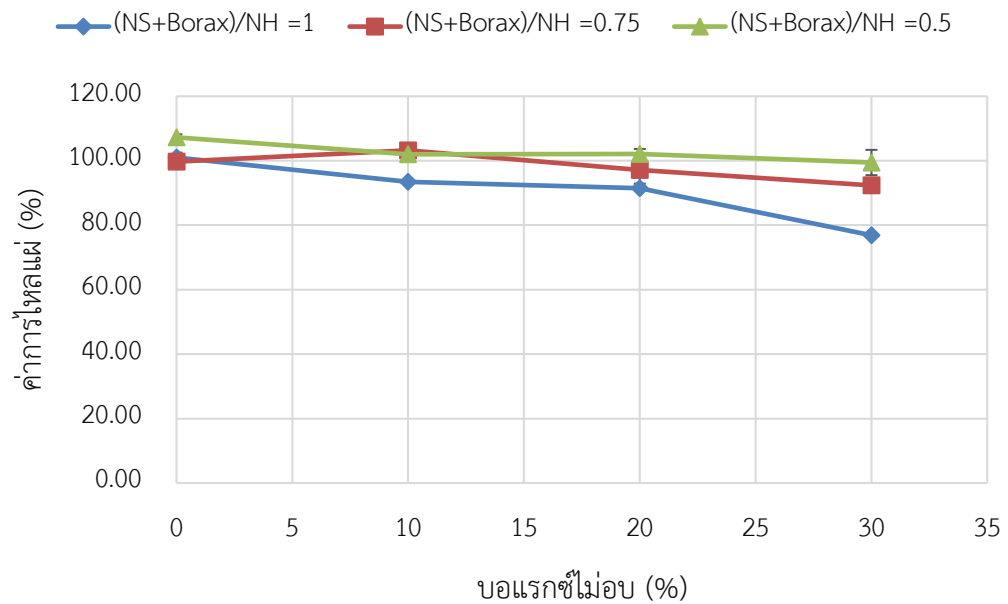
4.2.2 อิทธิพลของปริมาณการแทนที่โซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1) ความสามารถในการไหลแผ่ (Flowability)

ผลการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ของตัวอย่างบอโรลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (BASG) แสดงในรูปที่ 20 และ 21 พบว่าผลการทดสอบยังสอดคล้องกับรูปที่ 17 กล่าวคือ ค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างที่มีปริมาณโซเดียมซิลิเกต (NS) น้อยกว่าจะมีค่าที่สูงกว่า และจากผลการทดสอบเปรียบเทียบตามรูปที่ 20 และ 21 พบว่าตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบอบแห้งและแบบไม่อบแห้ง เมื่อแทนที่บอแรกซ์ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าค่าการไหลแผ่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างบอแรกซ์อบแห้งและไม่อบแห้ง พบว่าบอแรกซ์แบบไม่อบแห้งให้ค่าการไหลแผ่ที่มากกว่าแบบอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสมที่แทนที่ NS ด้วยบอแรกซ์อบแห้งร้อยละ 30 ที่ความสามารถในการไหลน้อยจนไม่สามารถวัดค่าการไหลแผ่ได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากผลการทดสอบ XRD ตามรูปที่ 16 บอแรกซ์แบบอบแห้งสามารถทำปฏิกิริยาได้ว่องไวมากกว่าแบบไม่อบแห้ง ส่งผลให้ส่วนผสมมีความเหนียวและมีค่าการไหลแผ่น้อยกว่า



รูปที่ 20 ค่าการไหลผ่านของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบอบแห้งร้อยละ 10, 20 และ 30



รูปที่ 21 ค่าการไหลผ่านของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบร้อยละ 10, 20 และ 30

2) โพร่งและการดูดซึมน้ำ (Porosity and Absorption)

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบโพร่งในตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ จะเห็นได้ว่าโพร่งของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้บอแรกซ์ทั้งสองประเภทแทนที่สารละลายโซเดียมซิลิเกต ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ใช้ (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 มีปริมาณโพร่งเท่ากับ 15.5%, 16.3%, 18.3% และ 18.8% เมื่อผสมบอแรกซ์อบแห้งร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำตามตารางที่ 7 พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบโพร่ง เมื่อปริมาณโพร่งสูงขึ้นส่งผลให้ตัวอย่าง BASG มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

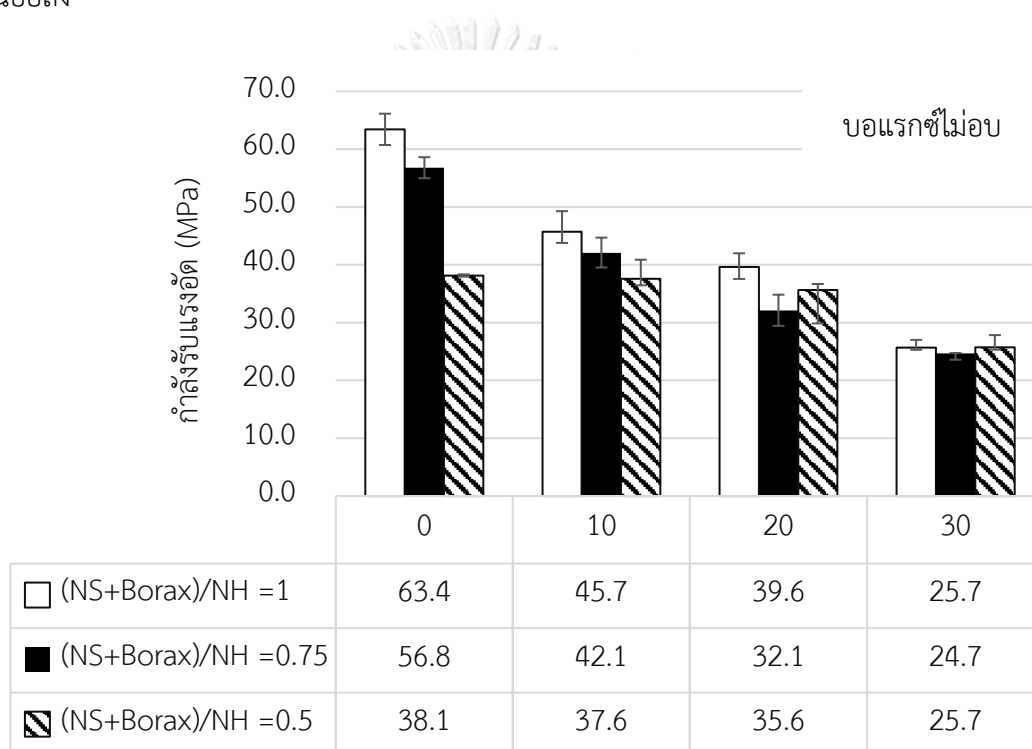
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบโพร่งและการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง BASG

(NS+borax)/NH	บอแรกซ์ (%)	โพร่ง (%)		การดูดซึมน้ำ (%)	
		บอแรกซ์อบ (AB)	บอแรกซ์ไม่อบ (NB)	บอแรกซ์อบ (AB)	บอแรกซ์ไม่อบ (NB)
1.00	0	12.6±0.11	12.6±0.13	5.26±0.05	5.26±0.03
	10	13.1±0.72	16.3±0.65	5.38±0.29	7.01±0.19
	20	13.4±0.30	17.6±0.26	5.54±0.10	7.48±0.07
	30	17.2±0.22	17.8±0.18	7.04±0.14	7.87±0.16
0.75	0	13.8±0.13	13.8±0.15	6.07±0.07	6.07±0.05
	10	13.2±0.55	18.4±0.48	5.62±0.24	7.91±0.16
	20	15.2±0.07	18.0±0.02	5.72±0.05	7.74±0.02
	30	15.2±0.14	19.4±0.13	5.72±0.17	8.19±0.26
0.50	0	15.5±0.24	15.5±0.26	6.24±0.03	6.24±0.01
	10	16.3±1.28	15.8±0.80	6.98±0.64	6.10±0.50
	20	18.3±0.38	16.1±0.26	7.33±0.25	6.00±0.30
	30	18.8±0.04	16.3±0.02	7.68±0.01	5.90±0.03

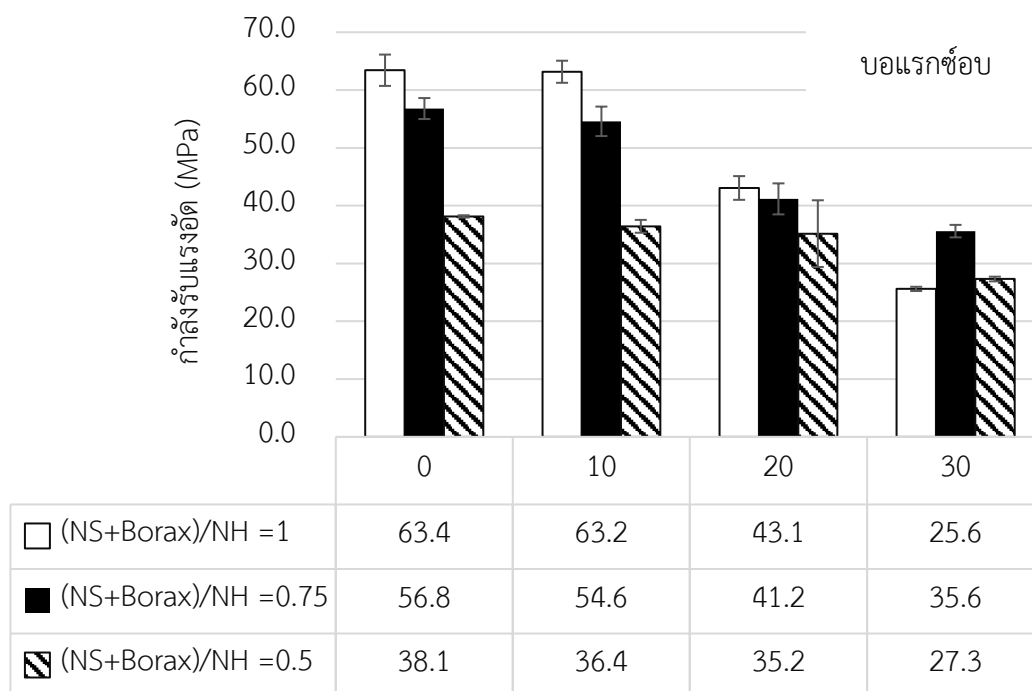
3) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

รูปที่ 22 และ 23 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์อบแห้งและไม่อบแห้ง จะเห็นได้ว่าเมื่อแทนที่โซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์ส่งผลให้กำลังรับ

แรงอัดลดลง ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่มีอัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.75 และผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้งร้อยละ 10, 20 และ 30 มีค่ากำลังอัดลดลงร้อยละ 26, 44 และ 57 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มีสัดส่วน (NS+borax)/NH เท่ากันแต่ไม่ผสมบอแรกซ์ แนวโน้มของผลการทดสอบสอดคล้องกับปริมาณโพรงที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 6 และเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Bagheri et al. (2018) การลดลงของความแข็งแรงในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่าง Al-O-Si และ Si-O-Si ลดลง และถูกแทนที่ด้วยพันธะ B-O-Si นอกจากนี้ Bagheri et al. (2018) ยังระบุว่าบอแรกซ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ตัวอย่างดูดซับพลังงานได้น้อยลง

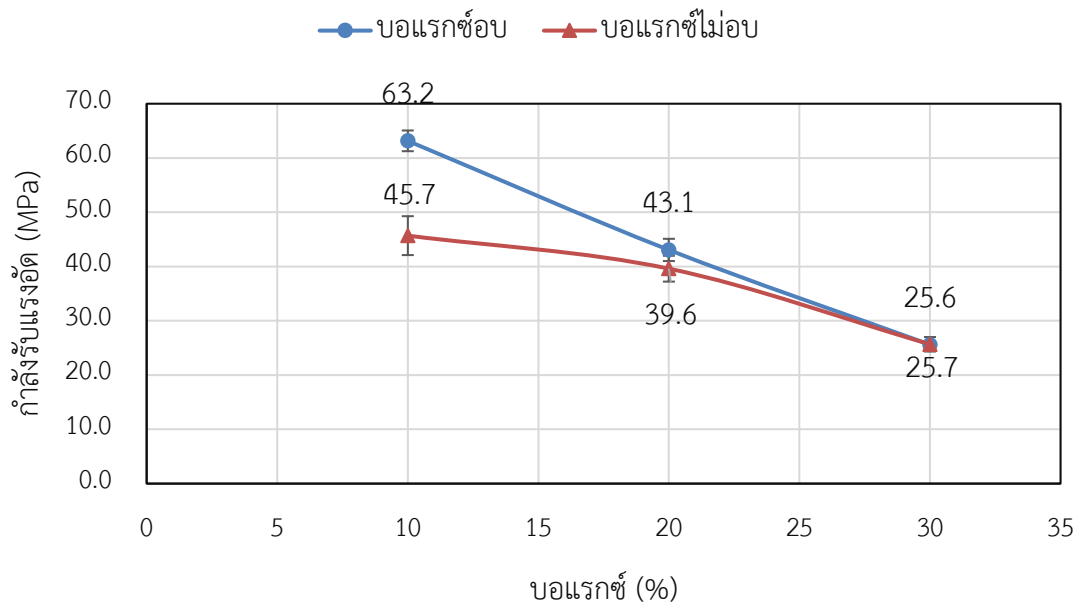


รูปที่ 22 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง ร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ

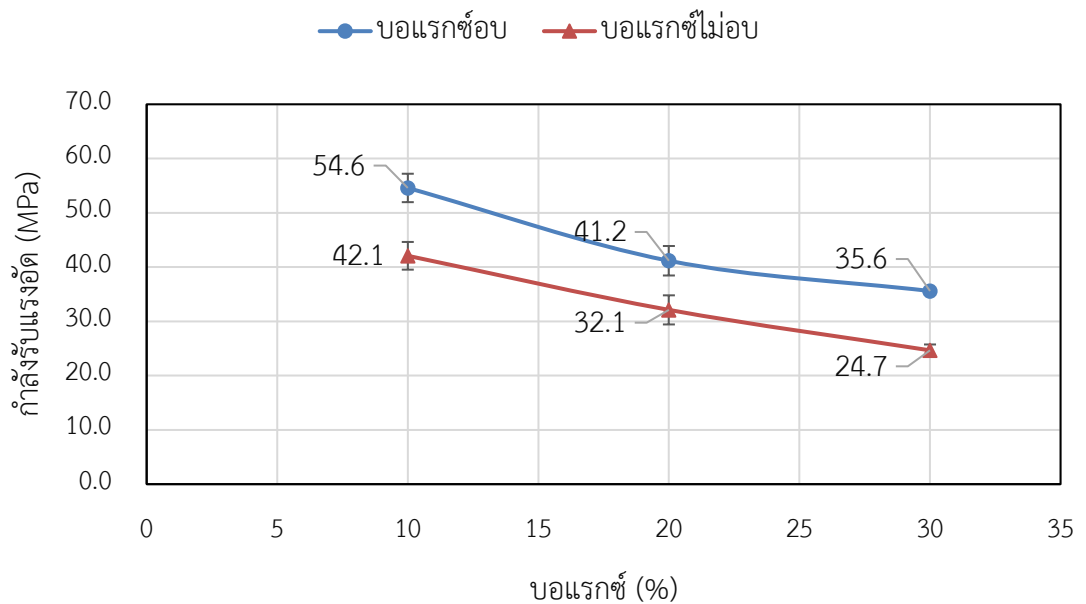


รูปที่ 23 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบบอบแห้ง ร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ

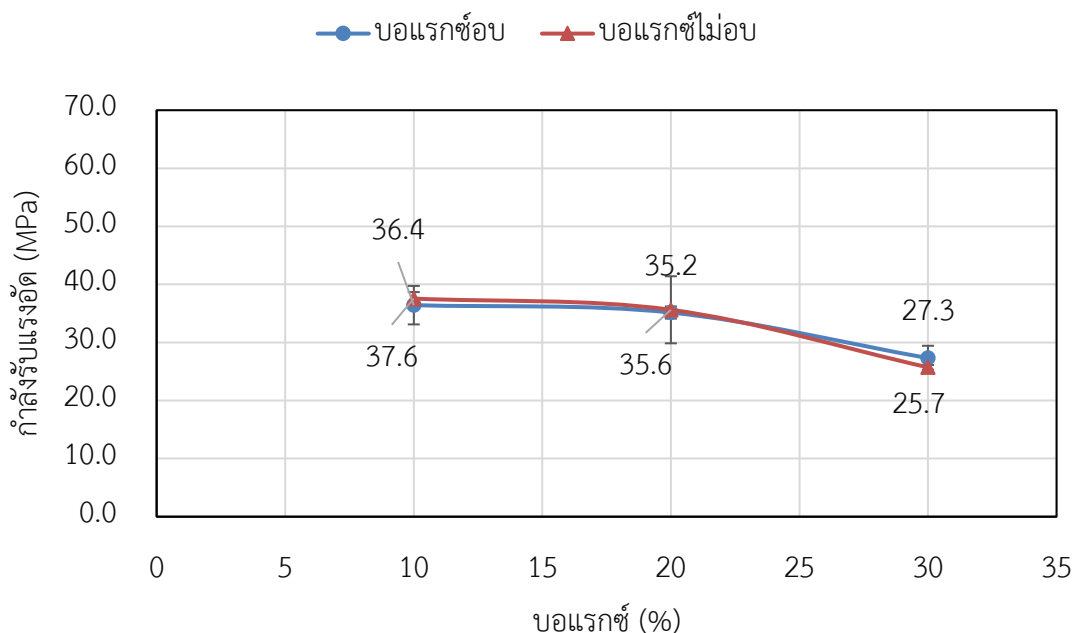
จากการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ทที่ผสมบอแรกซ์แบบบอบแห้งและไม่อบแห้งร้อยละ 10 พบว่าที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1 ตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบบอบ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 63.2 เมกะปาสกาล ในขณะที่ตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้งให้กำลังอัดเท่ากับ 45.7 เมกะปาสกาล จากรูปที่ 23 พบว่าแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มบอแรกซ์เข้าไปในตัวอย่าง และจากแนวโน้มพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากบอแรกซ์แบบบอบแห้งมีค่าสูงกว่าแบบไม่อบแห้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Williams and van Riessen (2011) บอแรกซ์แบบบอบแห้งสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าบอแรกซ์แบบไม่อบ และผลการทดสอบ XRD (รูปที่ 16) ที่พบว่าบอแรกซ์แบบบอบแห้งมีความเป็นอสัณฐานสูงกว่าจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าบอแรกซ์แบบไม่อบแห้ง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบบ่งชี้ว่าผลของการใช้บอแรกซ์ทั้งสองประเภทไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์อย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 24-



รูปที่ 24 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1 ที่บอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบบอบแห้งและไม่อบแห้ง



รูปที่ 25 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.75 ที่บอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบบอบแห้งและไม่อบแห้ง

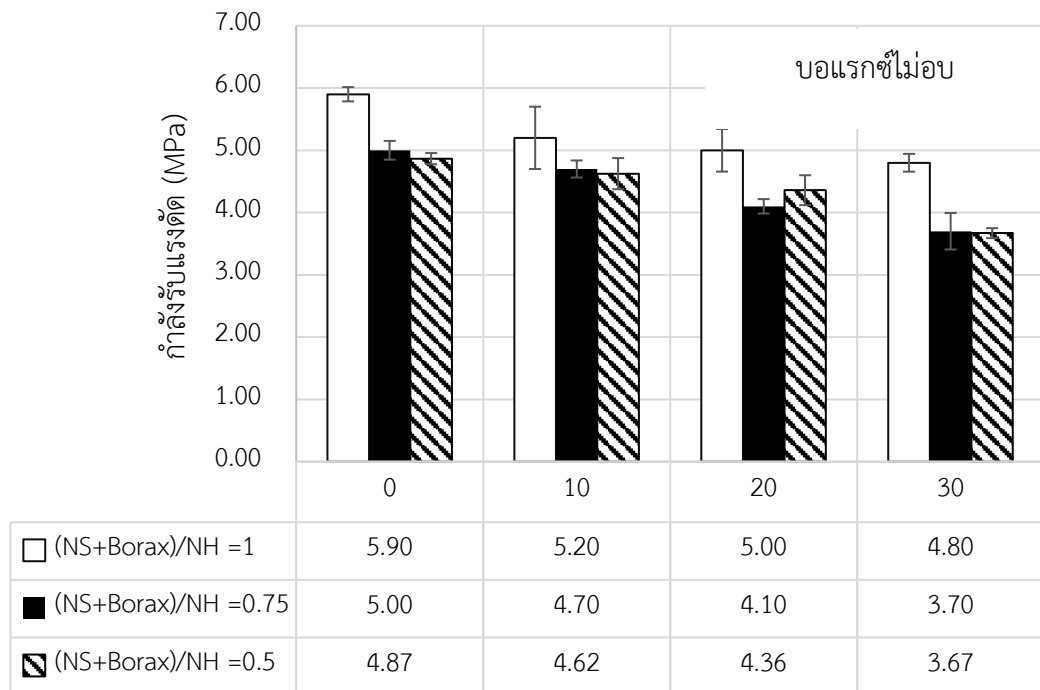


รูปที่ 26 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 ที่บอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบข้อบแ่ห่งและไม่ข้อบแ่ห่ง

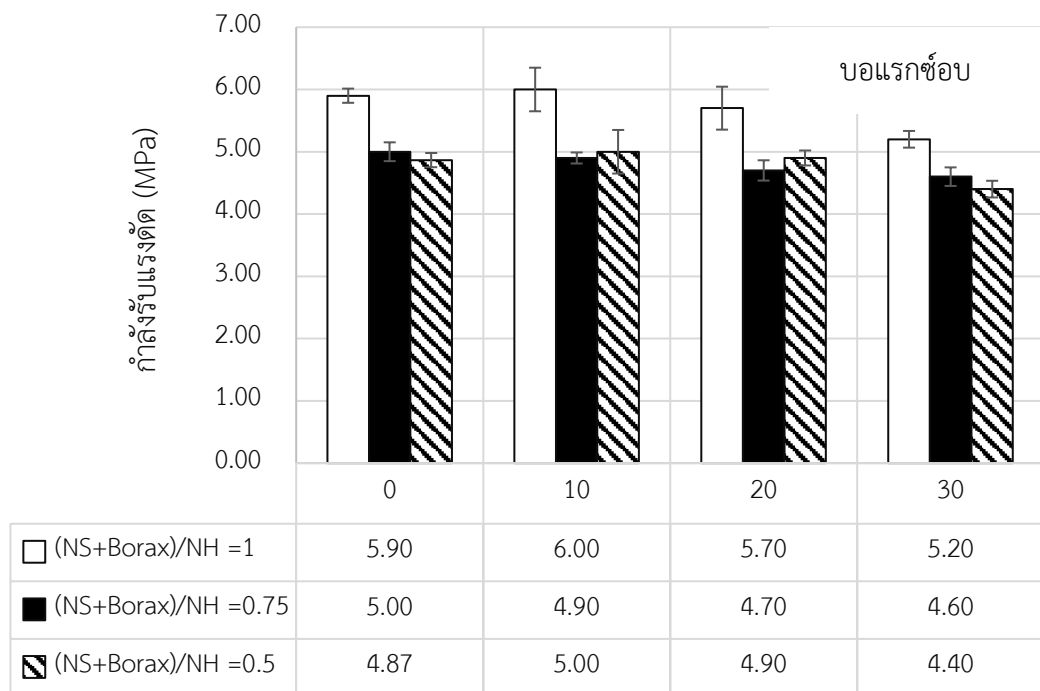
4) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

รูปที่ 27 และ 28 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทที่ผสมบอแรกซ์ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 จะเห็นได้ว่าเมื่อแทนที่โซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด และผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bagheri et al. (2018) เมื่อปริมาณบอแรกซ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดพันธะ B-O ที่มากขึ้นแทนที่ Si-O-Si ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีการดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า ยกตัวอย่างเช่นตัวอย่าง 0.5-NB10, 0.5-NB20 และ 0.5-NB30 มีกำลังดัดลดลงร้อยละ 5, 10 และ 25 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม 0.5-NB0

โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างบอแรกซ์แบบข้อบแ่ห่งและไม่ข้อบแ่ห่งแล้ว พบว่าในตัวอย่างที่มีอัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1 นั้น มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ได้จากบอแรกซ์แบบข้อบสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลของตัวอย่างที่มีอัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.75 และ 0.5 เช่นกัน



รูปที่ 27 กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 โดยผสมบอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบไม่อบแห้งตามลำดับ

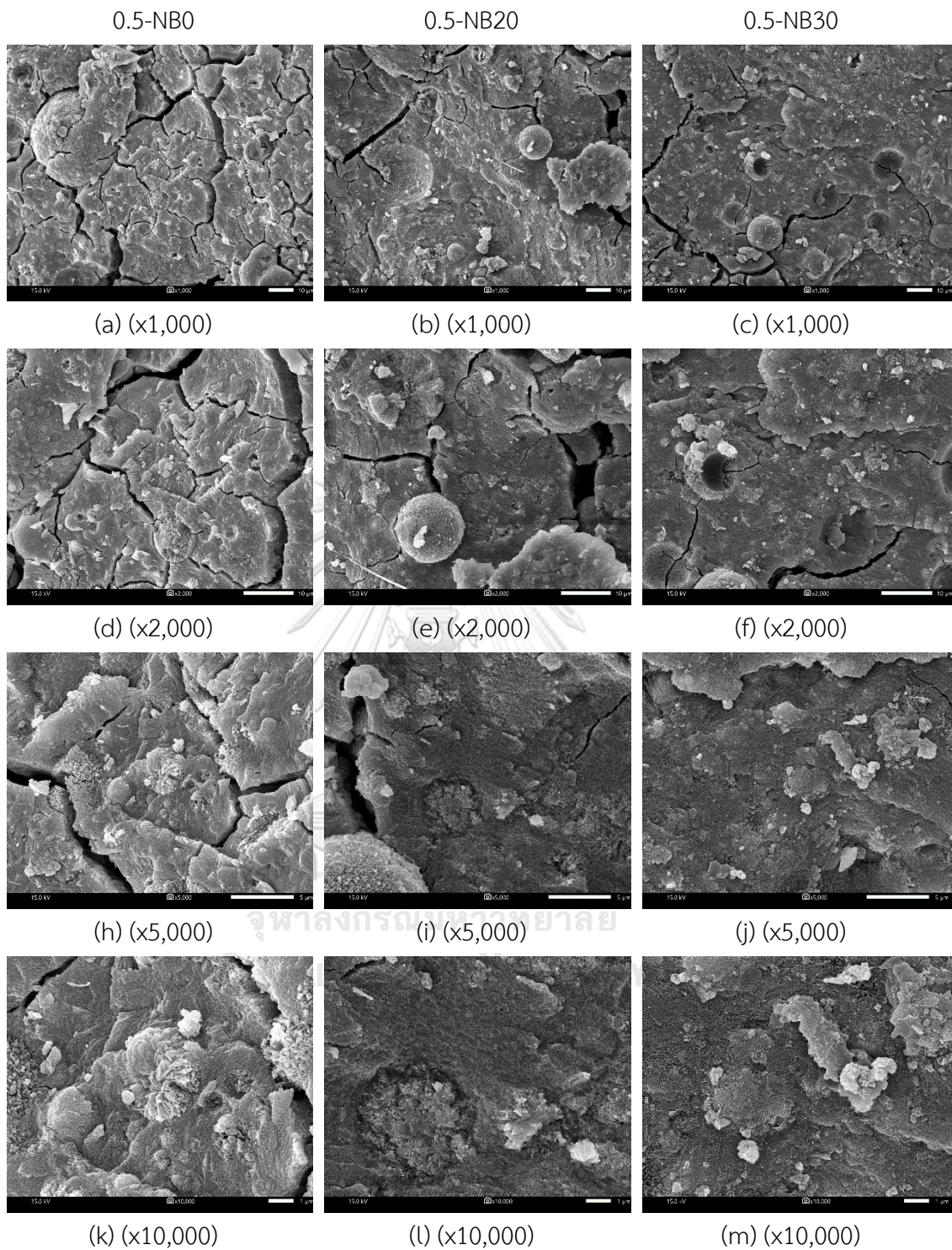


รูปที่ 28 กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 โดยผสมบอแรกซ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 แบบอบแห้งตามลำดับ

5) การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

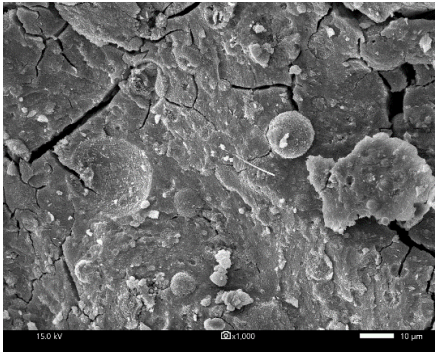
จากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี SEM ของตัวอย่าง 0.5-NB0, 0.5-NB20 และ 0.5-NB30 ที่กำลังขยาย 1,000, 2,000, 5,000 และ 10,000 เท่า ผลที่ได้พบว่า ตัวอย่าง 0.5-NB0 หรือ ตัวอย่างอลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์ (Aluminosilicate geopolymer, ASG) ซึ่งไม่มีบอแรกซ์ผสมอยู่จะมีรอยแตกบนตัวอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับตัวอย่าง BASG จากรูปที่ 29a พบว่า โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง ASG มีวัตถุลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ ซึ่งวัตถุทรงกลมนั้นก็คือ etailoy ที่ทำปฏิกิริยาได้ไม่หมด (Unreacted fly ash) ซึ่งติดอยู่บนเพสต์ ซึ่งetailoy ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดนั้นสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกันรอยแตกร้าวได้ กล่าวคือ รอยแตกจะไม่สามารถขยายตัวผ่านอนุภาคของetailoyไปได้ จึงส่งผลให้แรงถูกกระจายผ่านโดยรอบของอนุภาคetailoy ซึ่งผลที่ตามมา คือเกิดรอยร้าวเป็นแนวใหญ่บริเวณใกล้ๆ กับอนุภาคetailoy (Bagheri et al., 2018) ในทางกลับกัน ตัวอย่างที่เป็น BASG (รูปที่ 29b และ 29c) พบว่าจำนวนของetailoy ที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์นั้นน้อยลง ส่งผลให้รอยแตกร้าวที่เกิดจากการกระจายแรงนั้นลดลงไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างที่เป็น BASG นั้นจะมีพื้นผิวที่เรียบกว่า จากลักษณะของการกระจายแรงนี้ สามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่าง ASG สามารถกระจายแรงได้ดีกว่าตัวอย่าง BASG

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระดับจุลภาคระหว่าง 0.5-NB20 และ 0.5-AB20 ตามรูปที่ 30 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ได้พบว่า ตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบแห้งจะยังคงเหลืออนุภาคของetailoy ที่ไม่ทำปฏิกิริยาไว้ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDS) พบว่าอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ของส่วนผสม 0.5-NB20 และ 0.5-AB20 เท่ากับ 2.92 และ 2.42 ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุระหว่างตัวอย่างวัสดุที่ผสมบอแรกซ์แบบอบกับไม่อบมีความใกล้เคียงกัน



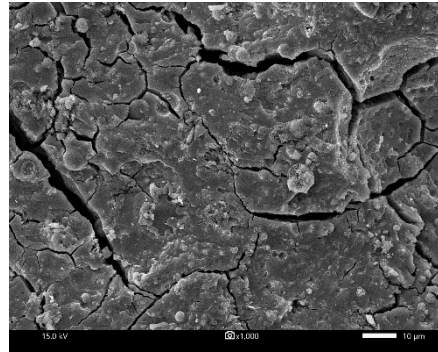
รูปที่ 29 โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB0, 0.5-NB20 และ 0.5-NB30

0.5-NB20

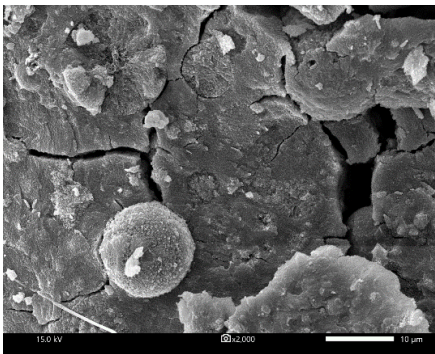


(a) (x1,000)

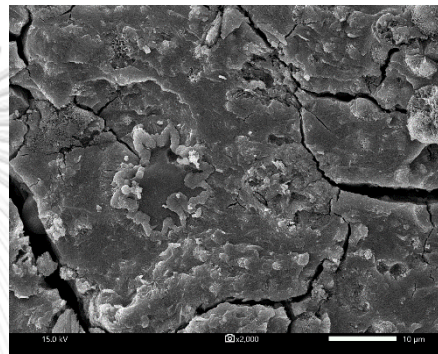
0.5-AB20



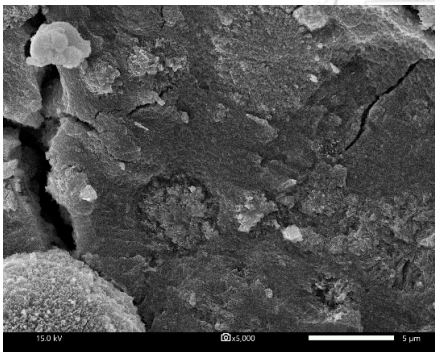
(b) (x1,000)



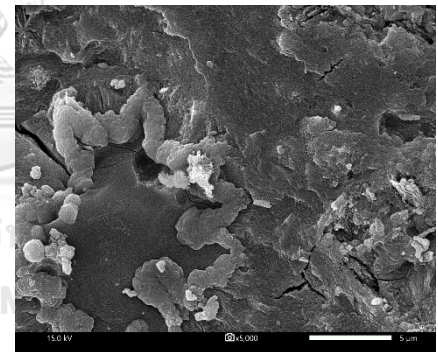
(c) (x2,000)



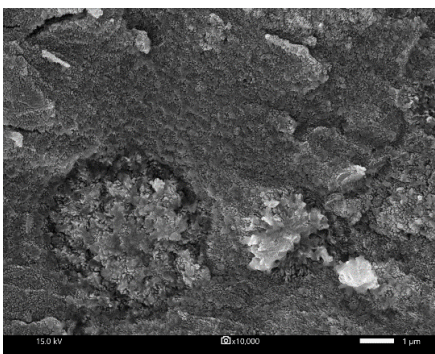
(d) (x2,000)



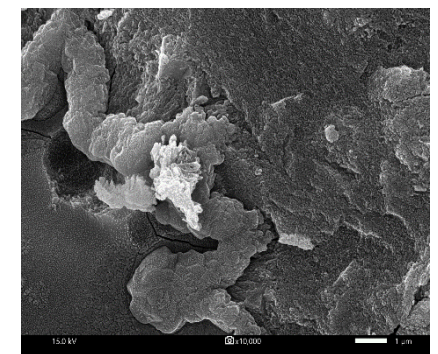
(e) (x5,000)



(f) (x5,000)



(g) (x10,000)



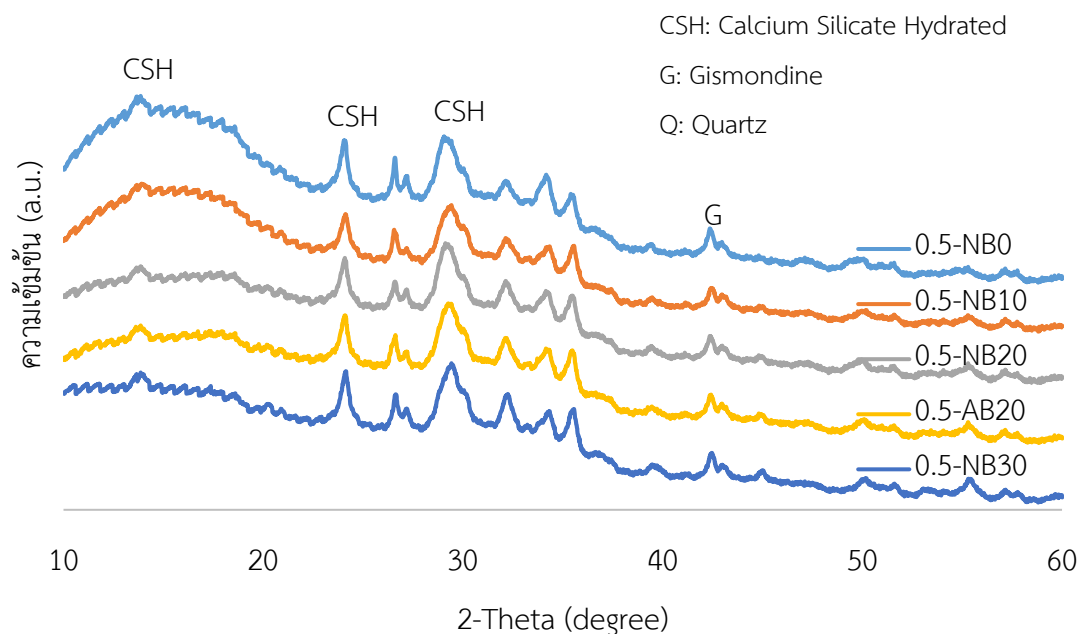
(h) (x10,000)

รูปที่ 30 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB20 และ 0.5-AB20

6) การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD)

ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธี X-ray diffraction เพื่อทำการวิเคราะห์เฟสต่าง ๆ ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ส่วนผสม 0.5-NB0, 0.5-NB10, 0.5-NB20 และ 0.5-NB30 ดังรูปที่ 31 พบว่าในช่วงประมาณ 30° (2-Theta) เป็นช่วงที่กราฟพุ่งขึ้นสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความ เป็นผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrated, CSH) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ช่วง 30 องศาเป็นช่วงที่มีความเป็นผลึกสูงมาก

ในขณะเดียวกันในช่วงที่ต่ำกว่า 20° องศากราฟจะมีการยกตัวสูงขึ้นลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในช่วงนี้จะเรียกได้ว่าเป็นช่วงที่เป็นอสัณฐาน (amorphous phases) โดยการยกตัวที่สูงขึ้นจะแสดง ถึงความเป็นอสัณฐานของโครงสร้างที่มากตามไปด้วยซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Ali Bagheri et al. (2017) โดยจากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เป็น BASG เมื่อเพิ่มปริมาณบอ แรกซ์ที่มากขึ้นส่งผลให้ความเป็นอสัณฐานลดลงตามไปด้วยเช่นกัน โดยความเป็นอสัณฐานที่ลดลงยัง ส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงด้วย ถือได้ว่าเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถอธิบายถึงการลดลง ของกำลังในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 31 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง BASG

4.2.3 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบเพิ่มร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6 ของน้ำหนักเถ้าลอย

จากผลการทดสอบตามข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 พบว่าเมื่อแทนที่โซเดียมซิลิเกต (NS) ด้วยบอแรกซ์ส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ลดลงตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่า อัตราส่วน (NS+borax)/NH ที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถนำมาพัฒนากำลังโดยผสมเถ้าแกลบเพิ่มได้คือ อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 เนื่องจากค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมากกว่าอัตราส่วนอื่น นอกจากนั้นส่วนผสมนี้ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น เนื่องจากมีปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกตน้อยที่สุด

1) โพร่งและการดูดซึมน้ำ (Porosity and absorption)

ตารางที่ 8 แสดงผลการทดสอบโพร่งและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 และผสมเถ้าแกลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมเถ้าแกลบเข้าไปในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะส่งผลให้ปริมาณโพร่งลดลงอย่างเห็นได้ชัด ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่าง 0.5-NB20 เมื่อผสมเถ้าแกลบที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่าปริมาณโพร่งอยู่ที่ร้อยละ 16.1, 14.0, 13.4 และ 14.1 ซึ่งยังส่งผลให้ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำลดลงไปอีกด้วย ทั้งนี้ปริมาณโพร่งที่น้อยที่สุดในแต่ละส่วนผสมนั้น ปัจจัยที่สำคัญอยู่ที่ปริมาณเถ้าแกลบที่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่าง 0.5-NB20 มีปริมาณโพร่งที่น้อยที่สุดเมื่อผสมเถ้าแกลบเพิ่มที่ร้อยละ 4.8 ในขณะที่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 0.5-NB30 มีปริมาณโพร่งที่น้อยที่สุดเมื่อผสมเถ้าแกลบเพิ่มที่ร้อยละ 6 ทั้งนี้การผสมเถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมถือเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณ SiO_2 ถ้ามีมากเกินไปจะส่งผลให้การทำปฏิกิริยาไม่หมดส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของซิลิกาเจล ซึ่งส่งผลเสียต่อสมรรถนะของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเถ้ากลบ

บอแรกซ์ (%)	เถ้ากลบ (%)	โพรง (%)		การดูดซึมน้ำ (%)		SiO ₂ / Al ₂ O ₃
		บอแรกซ์อบ (AB)	บอแรกซ์ไม่อบ (NB)	บอแรกซ์อบ (AB)	บอแรกซ์ไม่อบ (NB)	
0	0.0	15.5±0.24		6.2±0.26		3.86
	3.6	12.6±0.22		5.2±0.06		4.09
	4.8	12.8±0.22		5.3±0.12		4.17
	6.0	13.8±0.07		6.2±0.15		4.25
10	0.0	16.3±1.28	15.8±0.80	7.0±1.28	6.1±0.80	3.81
	3.6	12.6±0.25	15.1±0.31	5.4±0.15	6.4±0.05	4.05
	4.8	12.2±0.09	14.3±0.16	5.6±0.07	6.3±0.01	4.12
	6.0	13.7±0.07	14.3±0.27	5.5±0.20	6.6±0.14	4.20
20	0.0	18.3±0.38	16.1±0.26	7.3±0.38	6.0±0.26	3.76
	3.6	13.6±0.26	14.0±0.11	5.9±0.14	5.9±0.05	4.00
	4.8	13.2±0.05	13.4±0.06	5.7±0.40	5.8±0.11	4.08
	6.0	13.9±0.07	14.1±0.00	6.0±0.07	6.3±0.01	4.15
30	0.0	18.8±0.04	16.3±0.02	7.7±0.04	5.9±0.02	3.72
	3.6	14.1±0.31	14.1±0.17	5.6±0.10	5.9±0.02	3.96
	4.8	13.2±0.08	14.2±0.04	5.6±0.36	6.0±0.04	4.03
	6.0	13.6±0.06	13.5±0.01	5.1±0.03	6.1±0.01	4.11

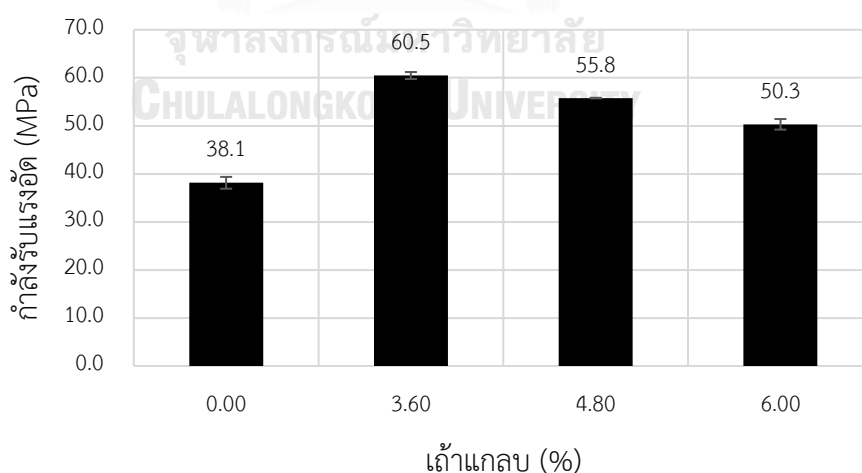
2) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ผลการทดสอบจากรูปที่ 32 พบว่า เมื่อผสมเถ้ากลบที่ร้อยละ 3.6 ถึง 6 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ในตัวอย่างอลูมิเนียมซิลิเกต (ASG) (ตัวอย่างที่ไม่ผสมบอแรกซ์) พบว่าเมื่อผสมเถ้ากลบที่ร้อยละ 3.6 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดถึง 60.5 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้ากลบยังสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับตัวอย่างบอโรลูมิเนียมซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (BASG) ได้เช่นเดียวกัน ตามรูปที่ 33 ถึง 35 โดยตามรูปที่ 33 เมื่อตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบร้อยละ 10 ผสมเถ้า

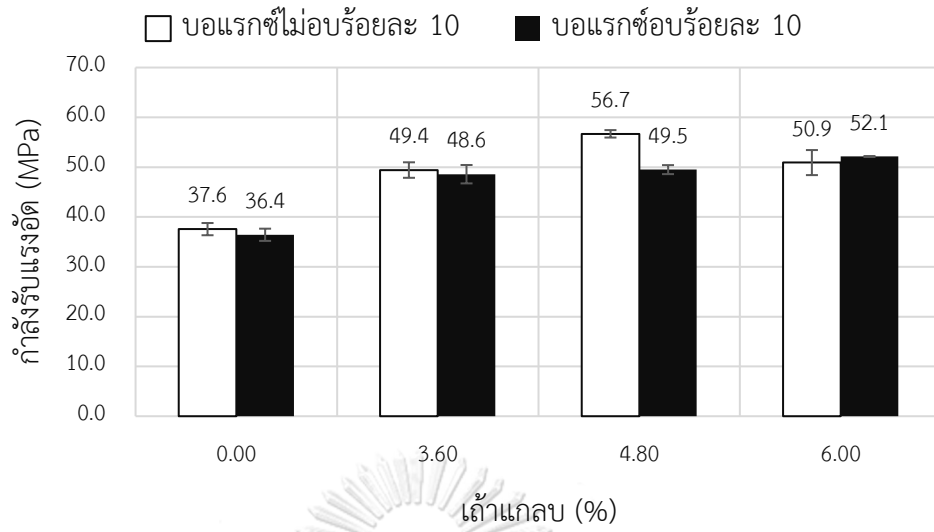
แกลบเพิ่มที่ร้อยละ 4.8 (0.5-NB10-4.8RHA) ให้กำลังอัดที่สูงที่สุดเท่ากับ 56.7 เมกะปาสคาล โดยมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มีปริมาณบอแรกซ์เท่ากันแต่ไม่ผสมแกลบซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 37.6 เมกะปาสคาล

ในขณะเดียวกันเมื่อแทนที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์ร้อยละ 20 และ 30 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะมีค่าสูงที่สุด เมื่อผสมแกลบร้อยละ 4.8 และ 6 โดยน้ำหนักของแกลบ ตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดของ 0.5-NB20-4.8RHA เท่ากับ 58.6 เมกะปาสคาล ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 64.6 ในขณะที่ตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุดเมื่อผสมแกลบเพิ่มที่ร้อยละ 6 โดยค่ากำลังรับแรงอัดของ 0.5-NB30-6RHA เท่ากับ 52.2 เมกะปาสคาลซึ่งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 100 หรือเพิ่มขึ้นเท่าตัว

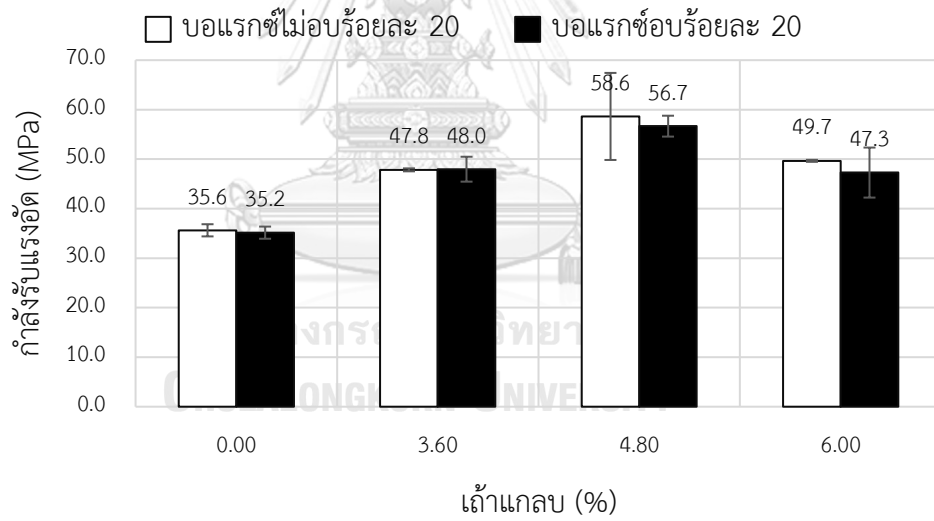
จากผลการทดสอบกำลังรับอัดพบว่า การเพิ่มแกลบลงในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถือเป็นการเพิ่มปริมาณซิลิกา (SiO_2) ในระบบ ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์สูงมากขึ้น โดยจะเป็นการเพิ่มพันธะ Si-O-Si ซึ่งแข็งแรงกว่า Si-O-Al และ Al-O-Al สอดคล้องกับงานวิจัยของ Duxson et al. (2005) และอาจกล่าวได้ว่าพันธะ Si-O-Si แข็งแรงมากกว่าพันธะ B-O ของ BASG อีกด้วย ทั้งนี้ปัจจัยที่สำคัญของค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงสุดของแต่ละส่วนผสม ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสม จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณแกลบที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุดในแต่ละส่วนผสมนั้นไม่เท่ากัน ตามตารางที่ 7 อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมและให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดอยู่ที่ 4.09 สำหรับ ASG และมีค่าอยู่ระหว่าง 4.08 ถึง 4.12 สำหรับ BASG



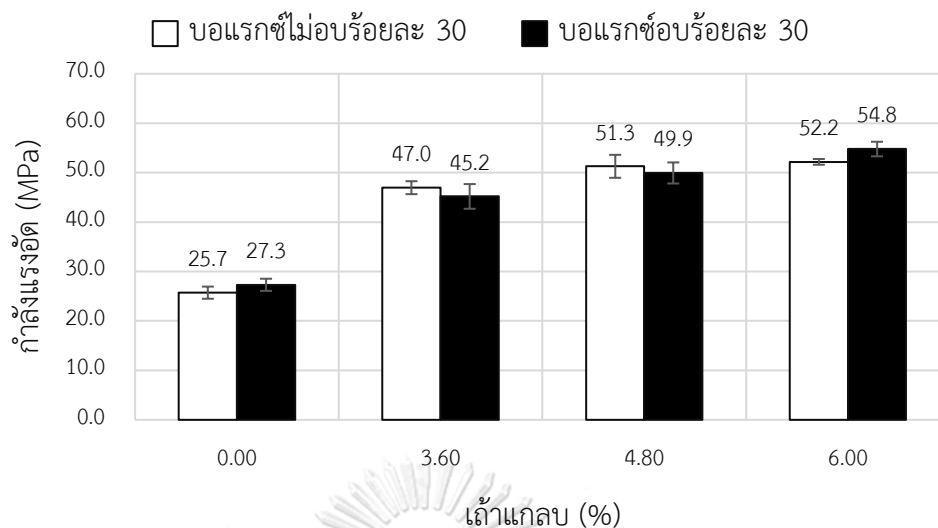
รูปที่ 32 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่ผสมบอแรกซ์



รูปที่ 33 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซีร้อยละ 10



รูปที่ 34 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซีร้อยละ 20

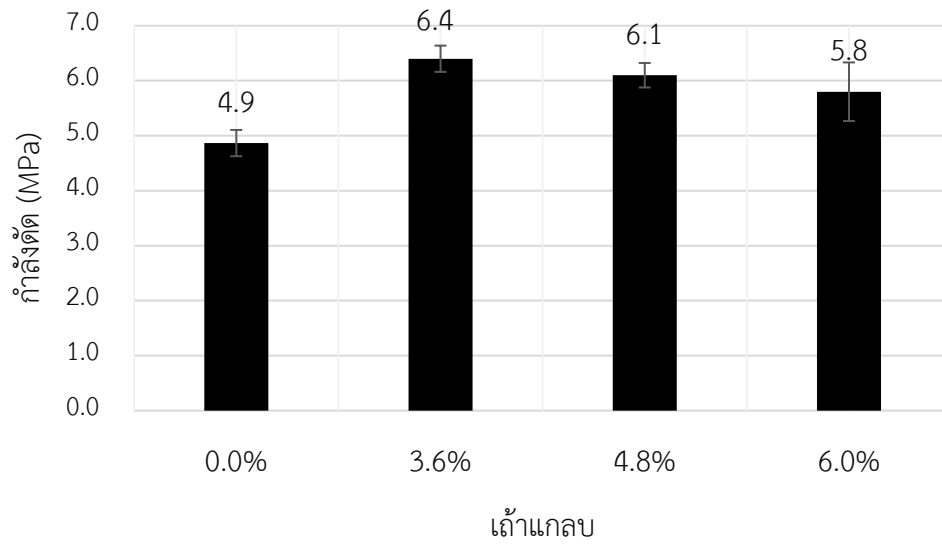


รูปที่ 35 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 30

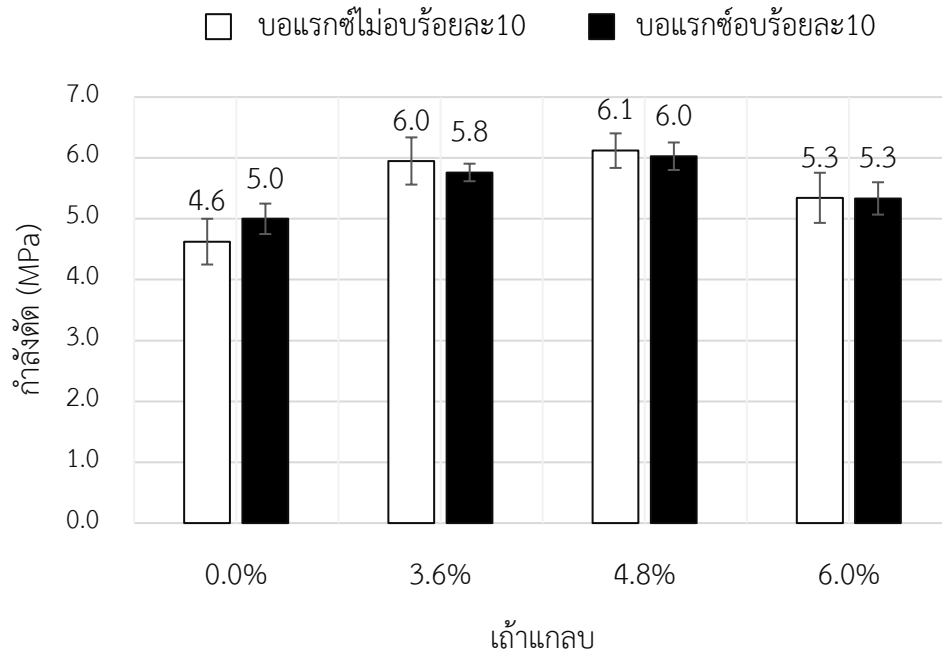
3) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบแสดงในรูปที่ 36 ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าตัวอย่างอลูมิเนียมซิลิเกตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ (ASG) มีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงสุดเท่ากับ 6.4 เมกะปาสคาล สำหรับตัวอย่าง 0.5-NB0-3.6RHA ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลกำลังรับแรงอัด โดยปัจจัยที่ส่งผลให้ค่ากำลังดัดของตัวอย่าง 0.5-NB0-3.6RHA มีค่าสูงสุดคืออัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.09

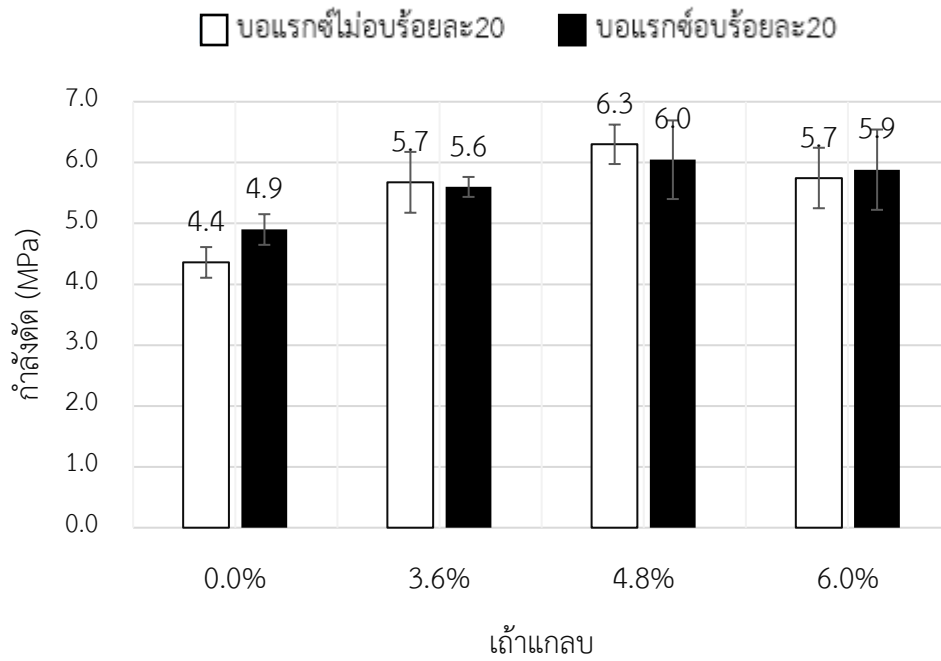
สำหรับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของบอโรลูมิเนียมซิลิเกตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ (BASG) พบว่าตัวอย่าง 0.5-NB10-4.8RHA, 0.5-NB20-4.8RHA และ 0.5-NB30-6RHA มีค่ากำลังดัดสูงสุดที่ 6.1, 6.3, 5.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยอัตราส่วนระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 ที่เหมาะสมของตัวอย่าง BASG อยู่ในช่วง 4.08-4.12 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลระหว่างตัวอย่าง BASG ที่ผสมบอแรกซ์แบบอบและบอแรกซ์แบบไม่อบจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก สามารถทดแทนกันได้



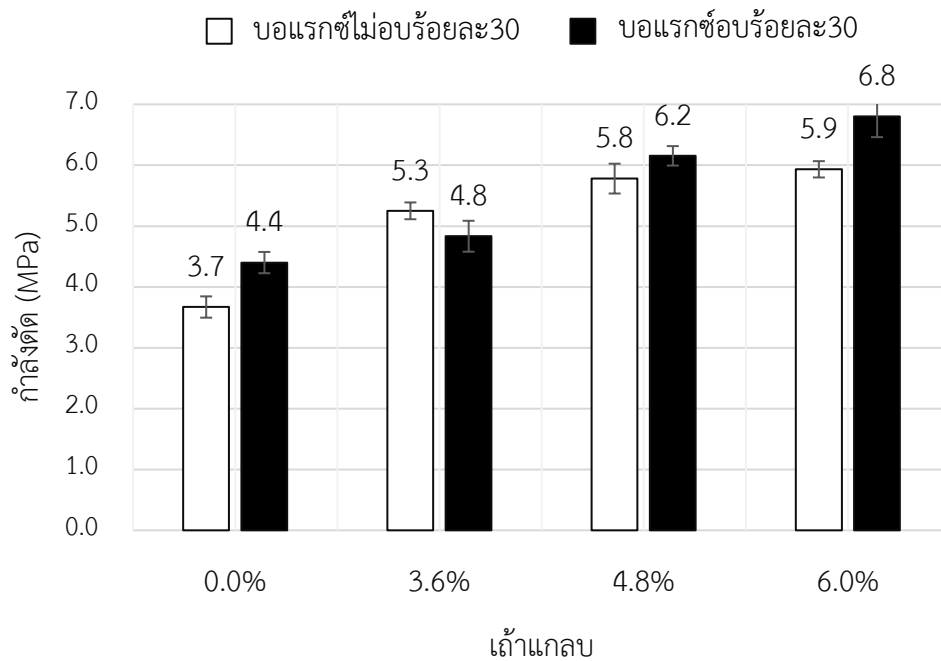
รูปที่ 36 กำลังรับแรงตัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ (ASG) ที่ผสมแก้วกลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6



รูปที่ 37 กำลังรับแรงตัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซ์ร้อยละ 10 และ แก้วกลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6



รูปที่ 38 กำลังรับแรงดัดของจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมบอแรกซีร้อยละ 20 และ เถ้ากลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6



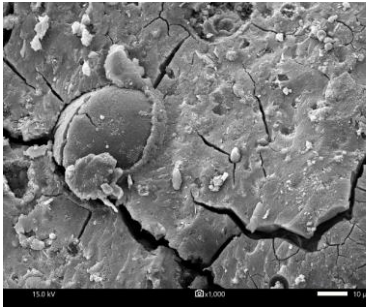
รูปที่ 39 กำลังรับแรงดัดของจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ (BASG) ที่ผสมบอแรกซีร้อยละ 30 และเถ้ากลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6

5) การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDS)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างอลูมิเนียมซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์และบอโรลูมิเนียมซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมแก้วกลบและบอแรกซ์ร้อยละ 20 พบว่าการเพิ่มปริมาณแก้วกลบในตัวอย่างส่งผลให้ปริมาณซิลิกาสูงขึ้นตามไปด้วย โดยจากผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณรูปที่ 42-49 โดยการวิเคราะห์ในบริเวณที่แตกต่างกัน 3 จุด ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9 จากผลการวิเคราะห์เทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดพบว่าตัวอย่าง 0.5-NB0-3.6RHA มีอัตราส่วนระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 เท่ากับ 2.98 และ 0.5-NB20-4.8RHA มีอัตราส่วนเท่ากับ 3.71 ทั้งนี้ผลการทดสอบอัตราส่วนที่ได้เป็นค่าที่วัดได้ซึ่งเกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์เจล แตกต่างจากอัตราส่วนที่ได้จากการคำนวณตามปริมาณวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในตารางที่ 8

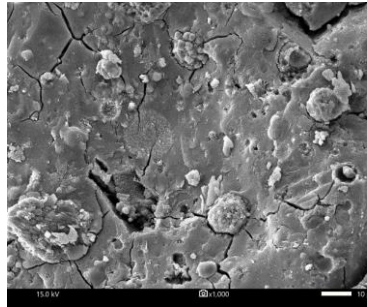


0.5-NB0-3.6RHA



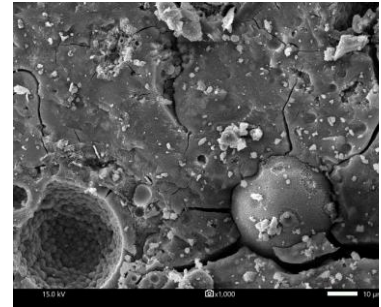
(a) (x1,000)

0.5-NB0-4.8RHA

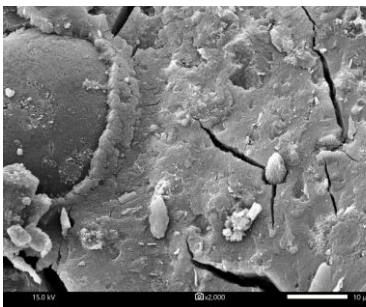


(b) (x1,000)

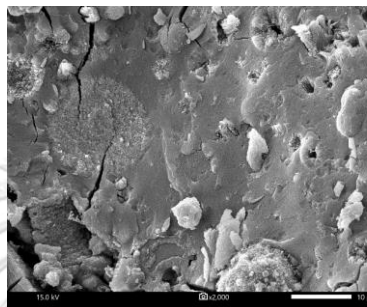
0.5-NB0-6RHA



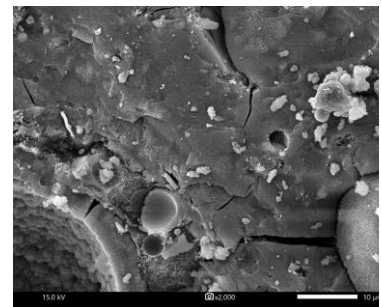
(c) (x1,000)



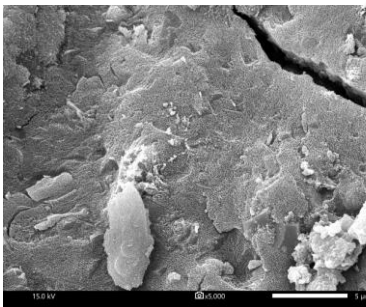
(d) (x2,000)



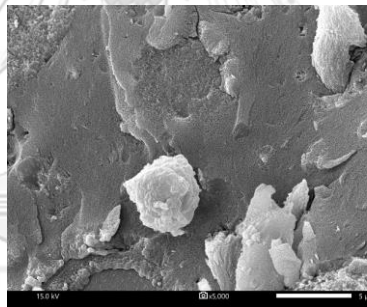
(e) (x2,000)



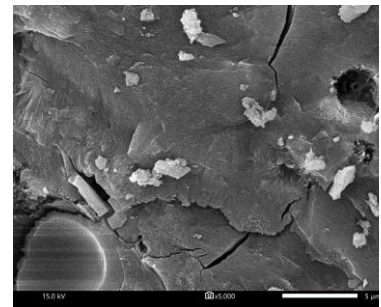
(f) (x2,000)



(h) (x5,000)



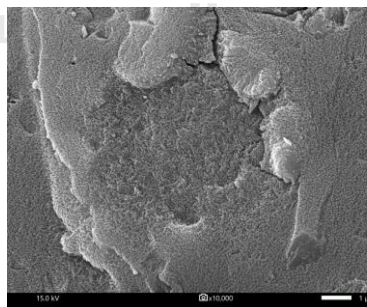
(i) (x5,000)



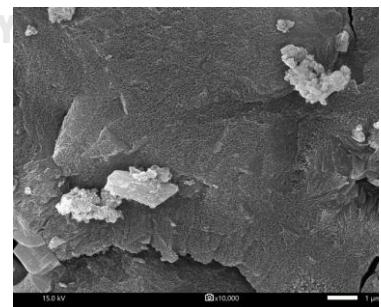
(j) (x5,000)



(k) (x10,000)

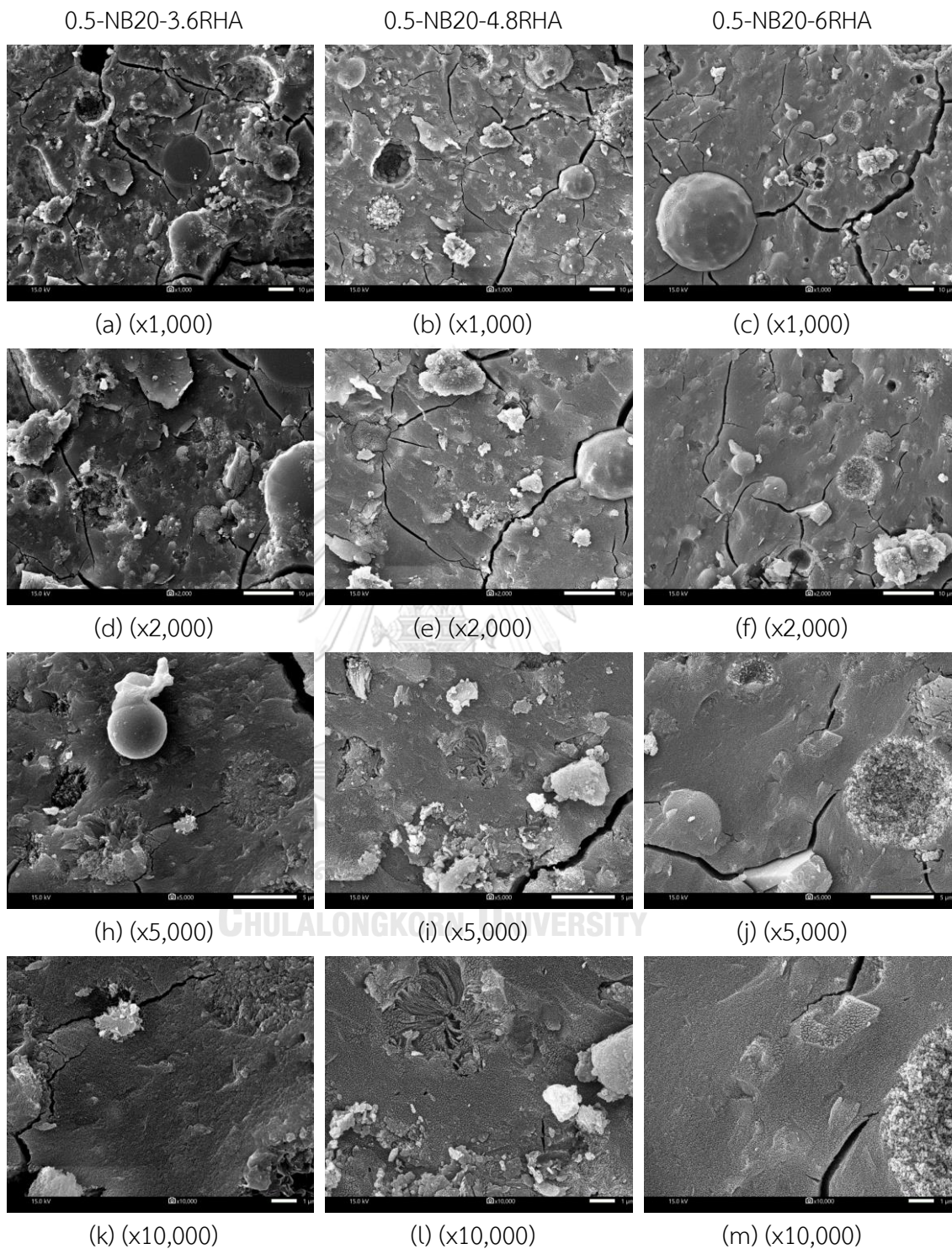


(l) (x10,000)



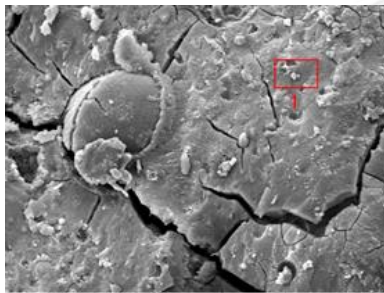
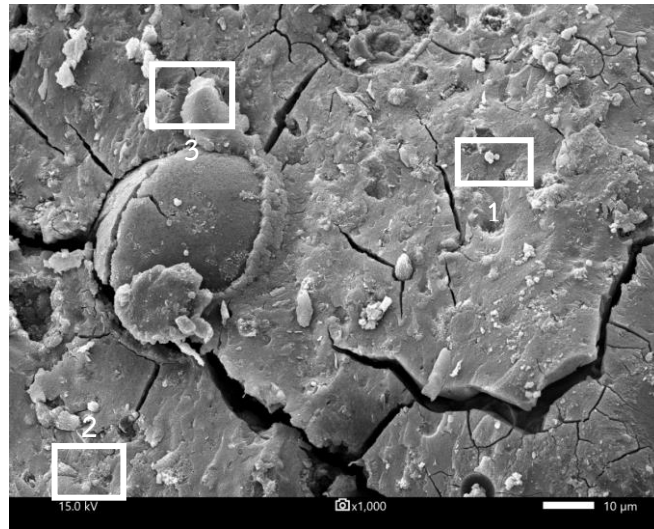
(m) (x10,000)

รูปที่ 40 โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB0-3.6RHA, 0.5-NB0-4.8RHA และ
0.5-NB0-6RHA

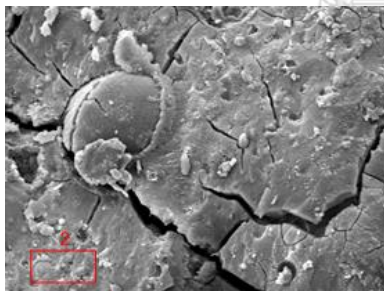


รูปที่ 41 โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง 0.5-NB20-3.6RHA, 0.5-NB20-4.8RHA และ 0.5-NB20-6RHA

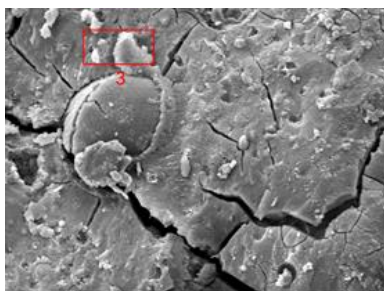
0.5-NB0-3.6RHA



Element	Mass%	Atom%
C	7.44±0.06	12.56±0.10
O	43.01±0.15	54.49±0.19
Na	9.08±0.08	8.00±0.07
Mg	3.38±0.05	2.82±0.04
Al	4.59±0.06	3.45±0.04
Si	14.24±0.09	10.28±0.07
Ca	12.40±0.11	6.27±0.05
Fe	5.87±0.11	2.13±0.04
Total	100.01	100.00



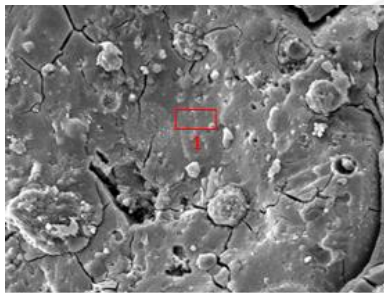
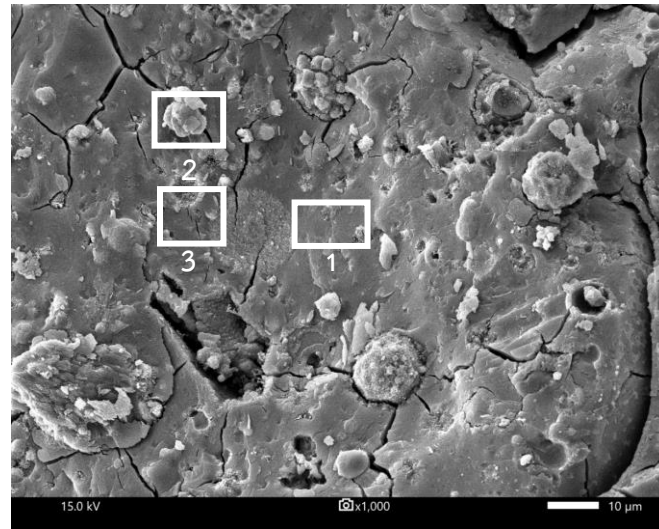
Element	Mass%	Atom%
C	7.11±0.06	11.99±0.09
O	43.34±0.14	54.84±0.18
Na	10.96±0.08	9.65±0.07
Mg	2.22±0.04	1.85±0.04
Al	5.03±0.06	3.78±0.04
Si	12.75±0.09	9.19±0.06
Ca	13.80±0.11	6.97±0.05
Fe	4.78±0.10	1.73±0.04
Total	99.99	100.00



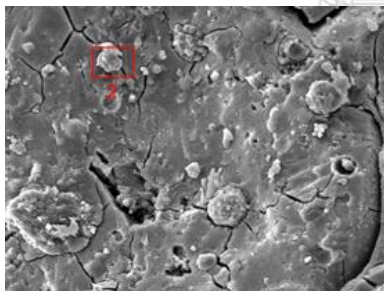
Element	Mass%	Atom%
C	7.66±0.06	12.88±0.10
O	42.83±0.15	54.10±0.19
Na	10.31±0.08	9.06±0.07
Mg	1.74±0.04	1.44±0.03
Al	4.58±0.06	3.43±0.04
Si	14.67±0.09	10.56±0.07
Ca	13.58±0.11	6.85±0.05
Fe	4.64±0.10	1.68±0.04
Total	100.01	100.00

รูปที่ 42 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB0-3.6RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า

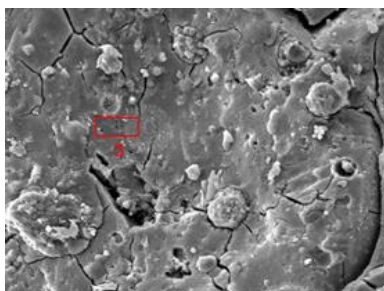
0.5-NB0-4.8RHA



Element	Mass%	Atom%
C	5.38±0.05	9.12±0.08
O	45.88±0.14	58.37±0.18
Na	11.12±0.08	9.84±0.07
Mg	1.24±0.04	1.04±0.03
Al	2.95±0.05	2.23±0.03
Si	14.29±0.09	10.35±0.06
Ca	14.43±0.11	7.33±0.05
Fe	4.71±0.10	1.72±0.04
Total	100.00	100.00



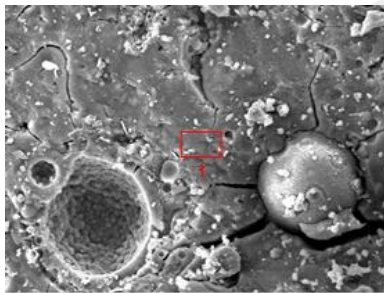
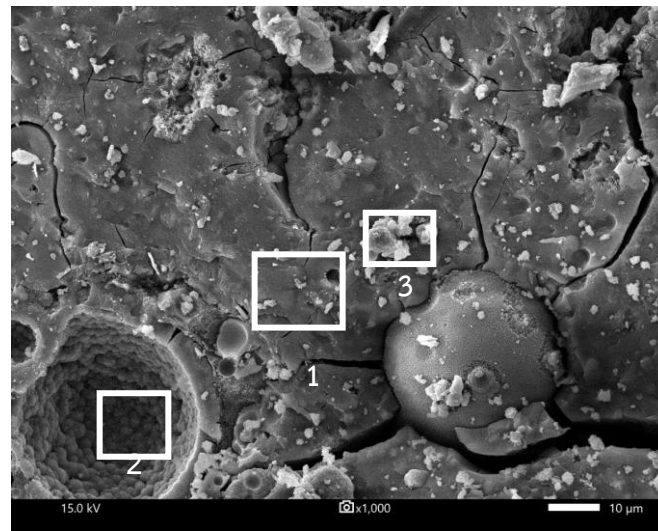
Element	Mass%	Atom%
C	6.77±0.05	11.74±0.09
O	42.93±0.16	55.84±0.21
Na	8.08±0.07	7.32±0.07
Mg	1.28±0.04	1.10±0.03
Al	3.25±0.05	2.50±0.04
Si	11.93±0.09	8.84±0.06
Ca	20.97±0.13	10.89±0.07
Fe	4.79±0.11	1.79±0.04
Total	100.00	100.02



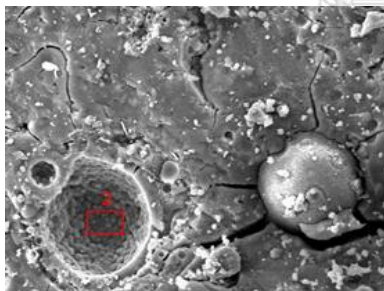
Element	Mass%	Atom%
C	6.04±0.05	10.92±0.09
O	38.69±0.13	52.53±0.18
Na	9.88±0.08	9.33±0.08
Mg	1.67±0.04	1.49±0.04
Al	4.51±0.06	3.63±0.04
Si	12.93±0.09	10.00±0.07
Ca	12.24±0.10	6.63±0.06
Fe	14.04±0.16	5.46±0.06
Total	100.00	99.99

รูปที่ 43 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB0-4.8RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า

0.5-NB0-6RHA



Element	Mass%	Atom%
C	4.89±0.05	8.47±0.09
O	42.57±0.14	55.33±0.19
Na	9.85±0.07	8.91±0.07
Mg	0.75±0.03	0.64±0.03
Al	6.41±0.06	4.94±0.05
Si	17.57±0.10	13.01±0.07
Ca	13.68±0.11	7.10±0.06
Fe	4.27±0.10	1.59±0.04
Total	99.99	99.99



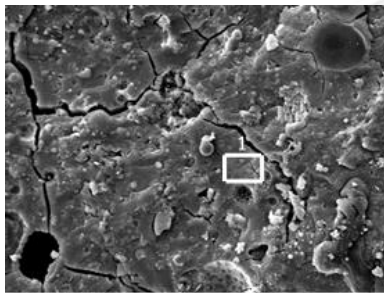
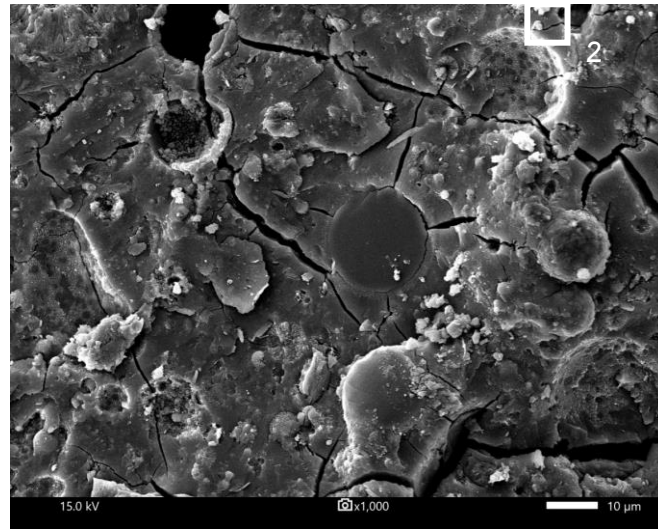
Element	Mass%	Atom%
O	39.34±0.38	55.47±0.53
Na	12.14±0.28	11.91±0.27
Al	13.69±0.29	11.44±0.24
Si	17.12±0.35	13.75±0.28
Ca	1.72±0.26	0.97±0.15
Fe	16.00±0.69	6.46±0.28
Total	100.01	100.00



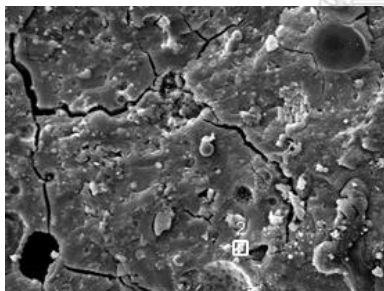
Element	Mass%	Atom%
C	9.01±0.05	14.89±0.08
O	47.05±0.15	58.37±0.19
Na	6.07±0.06	5.24±0.05
Mg	1.08±0.03	0.89±0.02
Al	3.14±0.04	2.31±0.03
Si	9.86±0.07	6.96±0.05
Ca	20.69±0.12	10.25±0.06
Fe	3.09±0.08	1.10±0.03
Total	99.99	100.01

รูปที่ 44 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB0-6RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า

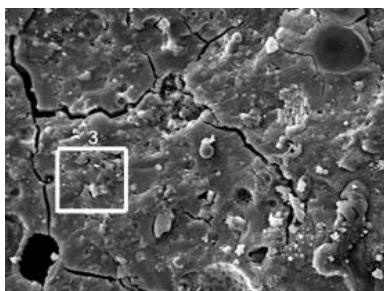
0.5-NB20-3.6RHA



Element	Mass%	Atom%
C	6.78±0.05	11.38±0.08
O	45.42±0.14	57.18±0.17
Na	10.41±0.07	9.12±0.06
Mg	1.63±0.04	1.35±0.03
Al	3.68±0.05	2.75±0.03
Si	13.43±0.08	9.63±0.06
Ca	13.23±0.10	6.65±0.05
Fe	5.42±0.10	1.95±0.04
Total	100.00	100.01



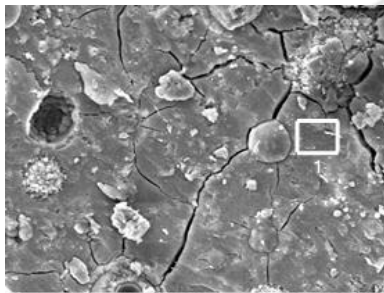
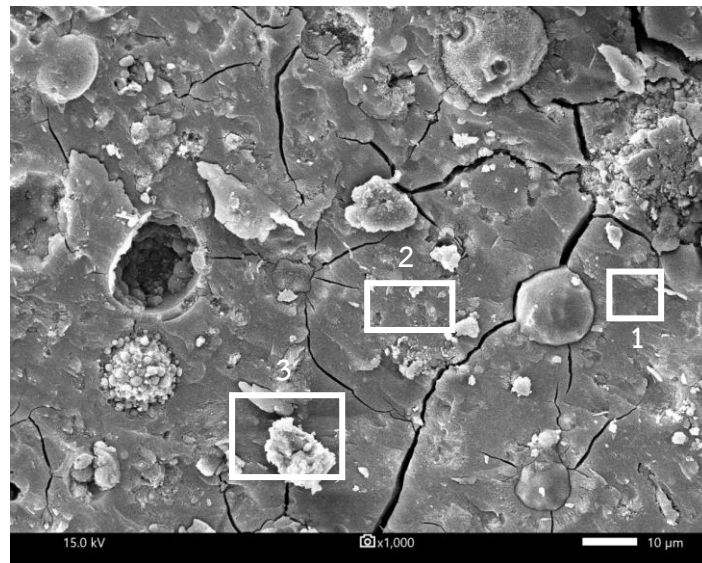
Element	Mass%	Atom%
C	7.29±0.05	11.84±0.08
O	49.24±0.13	60.02±0.16
Na	10.29±0.07	8.73±0.06
Mg	1.33±0.03	1.06±0.02
Al	3.15±0.04	2.28±0.03
Si	12.41±0.07	8.62±0.05
Ca	12.80±0.09	6.23±0.04
Fe	3.49±0.08	1.22±0.03
Total	100.00	100.00



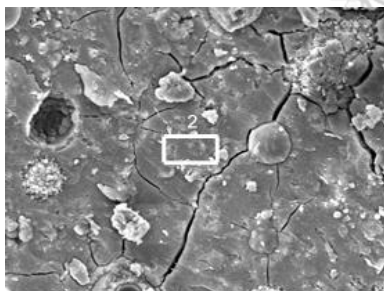
Element	Mass%	Atom%
C	7.92±0.05	13.32±0.09
O	43.71±0.14	55.21±0.18
Na	9.87±0.07	8.67±0.06
Mg	0.90±0.03	0.75±0.03
Al	4.55±0.05	3.41±0.04
Si	12.43±0.08	8.94±0.06
Ca	15.78±0.11	7.95±0.05
Fe	4.84±0.10	1.75±0.03
Total	100.00	100.00

รูปที่ 45 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB20-3.6RHA ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า

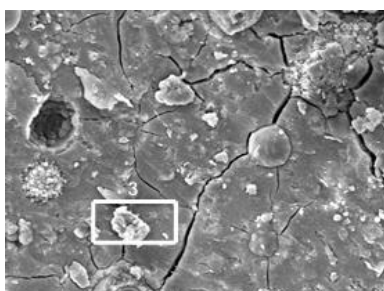
0.5-NB20-4.8RHA



Element	Mass%	Atom%
C	6.40±0.07	12.14±0.13
O	31.15±0.19	44.36±0.27
Na	7.52±0.09	7.45±0.09
Mg	1.02±0.05	0.95±0.04
Al	4.47±0.07	3.78±0.06
Si	17.27±0.13	14.01±0.11
S	nd	nd
Ca	26.04±0.19	14.80±0.11
Fe	6.14±0.16	2.51±0.06
Total	100.01	100.00



Element	Mass%	Atom%
C	7.41±0.07	13.38±0.13
O	34.36±0.17	46.59±0.24
Na	8.92±0.09	8.42±0.08
Mg	0.78±0.04	0.70±0.04
Al	6.18±0.07	4.97±0.06
Si	16.71±0.12	12.91±0.09
Ca	20.11±0.15	10.88±0.08
Fe	5.53±0.14	2.15±0.05
Total	100.00	100.00

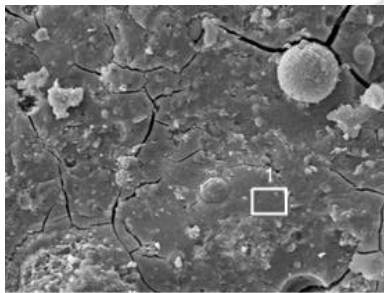
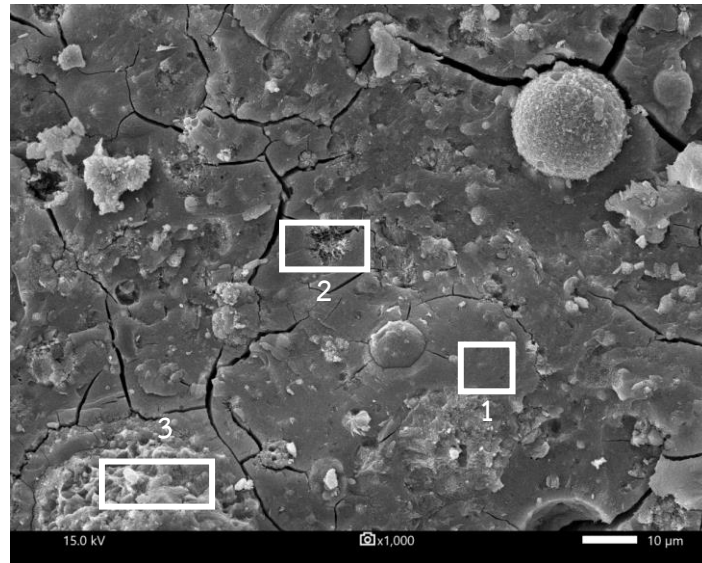


Element	Mass%	Atom%
C	8.77±0.06	15.19±0.11
O	39.40±0.17	51.20±0.22
Na	8.26±0.08	7.47±0.07
Mg	0.78±0.04	0.67±0.03
Al	4.32±0.06	3.33±0.04
Si	13.34±0.10	9.88±0.07
Ca	19.96±0.14	10.35±0.07
Fe	5.17±0.12	1.93±0.04
Total	100.00	100.02

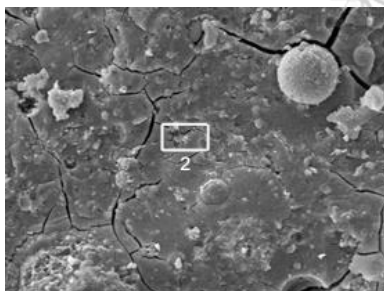
รูปที่ 46 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB20-4.8RHA ด้วยกำลังขยาย

1,000 เท่า

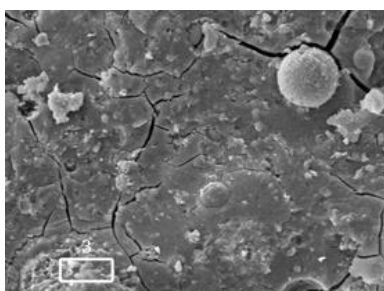
0.5-AB20-4.8RHA



Element	Mass%	Atom%
C	5.05±0.05	8.65±0.08
O	45.16±0.15	58.12±0.19
Na	10.05±0.07	9.00±0.07
Mg	0.68±0.03	0.58±0.03
Al	4.00±0.05	3.05±0.04
Si	14.24±0.09	10.44±0.06
Ca	17.08±0.11	8.77±0.06
Fe	3.74±0.09	1.38±0.03
Total	100.00	99.99



Element	Mass%	Atom%
C	5.25±0.05	9.18±0.09
O	41.96±0.16	55.10±0.21
Na	10.12±0.08	9.25±0.07
Mg	1.01±0.04	0.88±0.03
Al	4.96±0.06	3.86±0.05
Si	14.92±0.10	11.16±0.07
Ca	16.15±0.12	8.47±0.07
Fe	5.64±0.12	2.12±0.04
Total	100.01	100.02

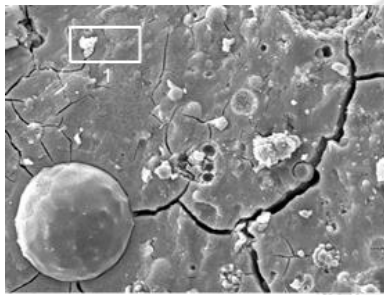
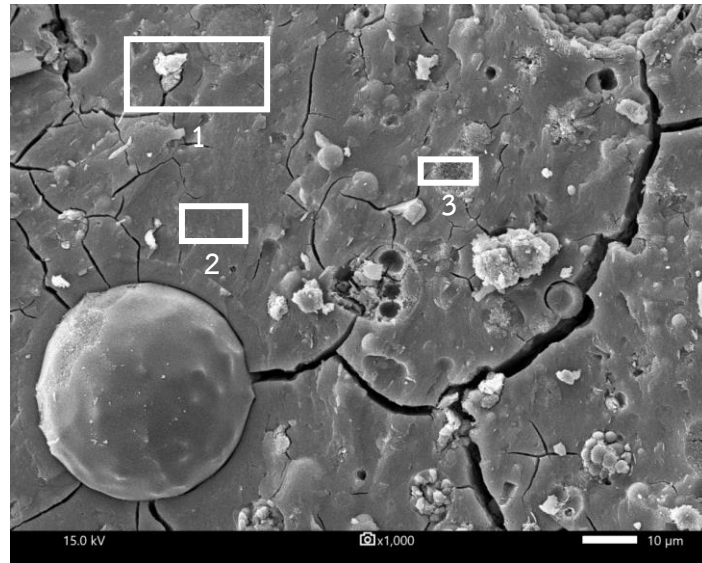


Element	Mass%	Atom%
C	6.25±0.04	11.22±0.08
O	42.57±0.11	57.34±0.15
Na	6.39±0.06	5.99±0.06
Mg	1.96±0.04	1.74±0.03
Al	5.05±0.05	4.03±0.04
Si	10.05±0.07	7.71±0.05
Ca	8.34±0.07	4.48±0.04
Fe	19.39±0.16	7.48±0.06
Total	100.00	99.99

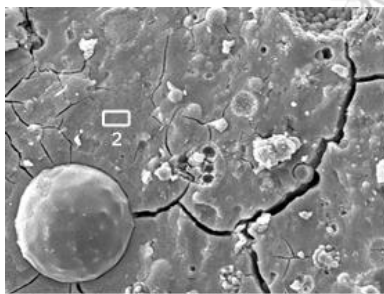
รูปที่ 47 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-AB20-4.8RHA ด้วยกำลังขยาย

1,000 เท่า

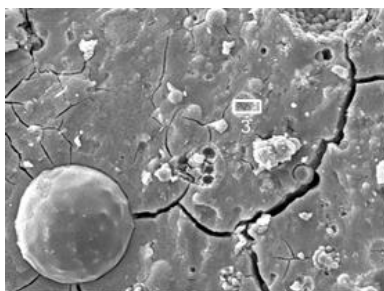
0.5-NB20-6RHA



Element	Mass%	Atom%
C	5.55±0.05	9.74±0.10
O	40.91±0.15	53.89±0.20
Na	9.67±0.08	8.86±0.07
Mg	1.36±0.04	1.18±0.03
Al	5.44±0.06	4.25±0.05
Si	15.47±0.10	11.61±0.08
Ca	15.70±0.12	8.25±0.06
Fe	5.91±0.12	2.23±0.05
Total	100.01	100.01



Element	Mass%	Atom%
C	5.67±0.06	9.88±0.11
O	38.16±0.15	49.89±0.20
Na	11.47±0.09	10.44±0.08
Mg	0.39±0.03	0.34±0.03
Al	9.26±0.08	7.18±0.06
Si	19.93±0.12	14.85±0.09
Ca	11.98±0.11	6.25±0.06
Fe	3.13±0.10	1.17±0.04
Total	99.99	100.00



Element	Mass%	Atom%
C	4.71±0.05	9.22±0.10
O	33.24±0.14	48.88±0.21
Na	4.97±0.07	5.08±0.07
Mg	5.76±0.07	5.57±0.07
Al	7.67±0.08	6.68±0.07
Si	9.94±0.09	8.33±0.08
Ca	12.19±0.12	7.16±0.07
Fe	21.53±0.22	9.07±0.09
Total	100.01	99.99

รูปที่ 48 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของตัวอย่าง 0.5-NB20-6RHA ด้วยกำลังขยาย

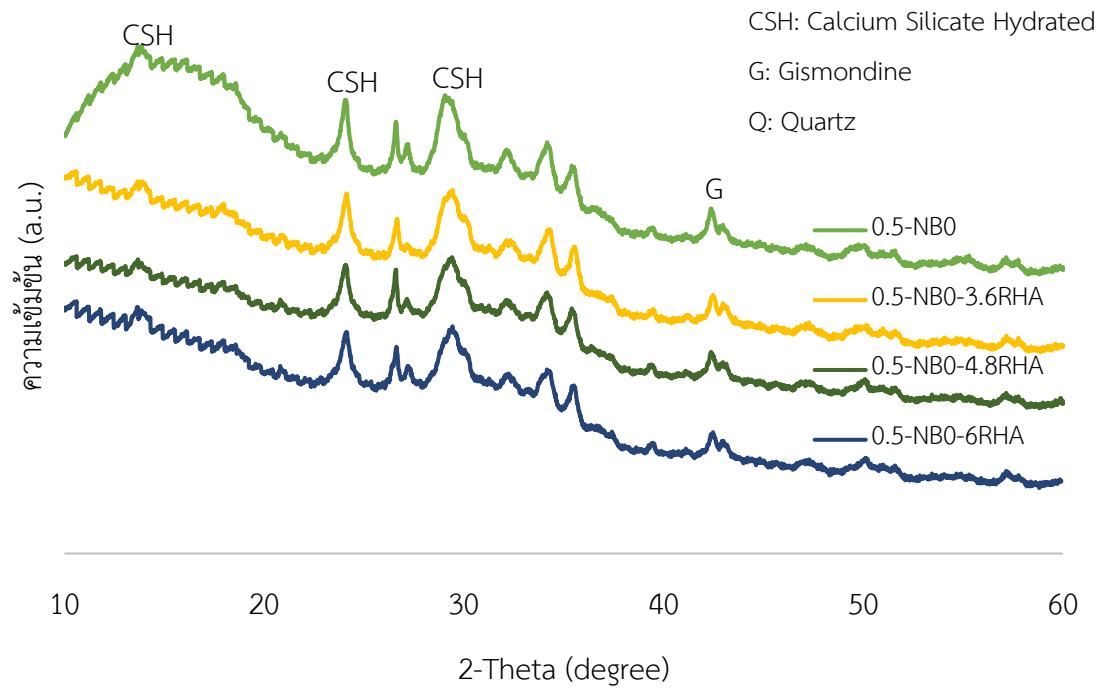
1,000 เท่า

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDS)

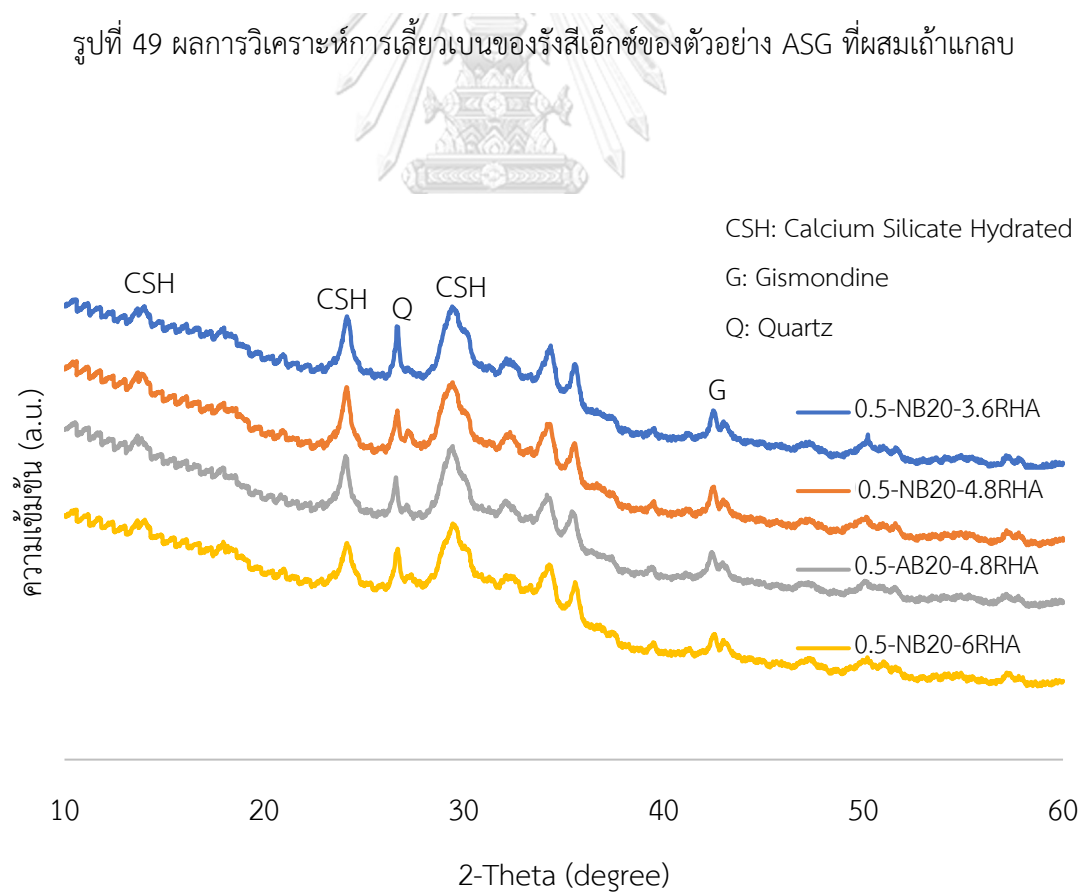
ร้อยละ อะตอมและ อัตราส่วน	0.5- NB0	0.5- NB0- 3.6RHA	0.5- NB0- 4.8RHA	0.5- NB0- 6RHA	0.5- NB20- 3.6RHA	0.5- NB20- 4.8RHA	0.5- AB20- 4.8RHA	0.5- NB20- 6RHA
Na, at.%	11.95	8.00	9.84	8.91	9.12	7.45	9.00	8.86
Al, at.%	4.53	3.45	2.23	4.94	2.75	3.78	3.05	4.25
Si, at.%	9.49	10.28	10.35	13.01	9.63	14.01	10.44	11.61
Ca, at.%	6.22	6.27	7.33	7.10	6.65	14.80	8.77	8.25
Na/Al	2.64	2.32	4.41	1.80	3.32	1.97	2.95	2.08
Si/Al	2.10	2.98	4.64	2.63	3.50	3.71	3.42	2.73
Ca/Al	1.37	1.82	3.29	1.44	2.42	3.92	2.88	1.94
Na/Si	1.26	0.78	0.95	0.68	0.95	0.53	0.86	0.76
Ca/Si	1.45	0.61	0.71	0.55	0.69	1.06	0.84	0.71

6) การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD)

รูปที่ 49 แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธี X-ray diffraction ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ เมื่อผสมเถ้าแกลบเพิ่มในส่วนผสมพบว่าความเป็นผลึกวัสดุจีโอโพลิเมอร์ลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากจุดพีคของ CSH ที่บริเวณ 24° และ 30° (2-Theta) ซึ่งอาจบอกเป็นนัยว่าเถ้าแกลบที่ใส่เพิ่มก่อให้เกิดการก่อตัวของโซเดียมซิลิเกตเจลหรือจีโอโพลิเมอร์เจลมากกว่าการเกิด CSH อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าจุดพีคของ Quartz จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากอนุภาคของเถ้าแกลบที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา ในขณะที่พฤติกรรมของ BASG ที่ผสมเถ้าแกลบมีลักษณะคล้ายกับ ASG ดังแสดงในรูปที่ 50 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มของจุดพีคของ Quartz ที่เกิดจากอนุภาคส่วนเกินของเถ้าแกลบ



รูปที่ 49 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง ASG ที่ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 50 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง BASG ที่ผสมร้อยละ 20 และผสมเถ้าแกลบ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตลงและแทนที่ด้วยบอแรกซ์หรือที่เรียกว่า วัสดุบอโรลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (BASG) ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการการผลิตโซเดียมซิลิเกตจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงในการให้ความร้อน ซึ่งส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณการใช้แก้วกลบต่อสมบัติของ BASG เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อแทนที่โซเดียมซิลิเกต (NS) ด้วยบอแรกซ์ส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำลง งานวิจัยนี้จึงทำการเสริมกำลังด้วยแก้วกลบ เนื่องจากแก้วกลบมีธาตุหลักเป็น SiO_2 ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันอย่างมาก

งานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณโซเดียมซิลิเกต (NS) ต่อสมบัติจีโอโพลิเมอร์ โดยวิเคราะห์ผลที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1, 0.75 และ 0.5 เพื่อบ่งชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ต่อมา (2) การวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณบอแรกซ์ โดยทำการแทนที่ NS ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 เพื่อหาส่วนผสม BASG ที่มีอัตราส่วน (NS+borax)/NH ที่เหมาะสมซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีสมบัติที่ดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด จากนั้น (3) การพัฒนาคุณสมบัติของ BASG ให้ดียิ่งขึ้น ด้วยการเพิ่มแก้วกลบที่ร้อยละ 3.6, 4.8 และ 6 โดยแต่ละส่วนจะทำการทดสอบ ค่ากำลังรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดัด ความสามารถในการไหลได้ การทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำ รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของวัสดุ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าสารละลายประเภทโซเดียมซิลิเกตมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุโดยตรง โดยเมื่อทำการทดสอบโดยการลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตลงจากอัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 1 เป็น 0.75 และ 0.5 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ลดลงร้อยละ 10.4 และ 39.9 ตามลำดับ ในทางกลับกันพบว่าเมื่อลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตลงส่งผลให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีความสามารถในการไหลดียิ่งขึ้น และในขณะเดียวกันการลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตลงจากอัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 1 เหลือ 0.5 สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 33.26

จากการวิเคราะห์ผลของตัวอย่างบอโรลูมินซิลิเกตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (BASG) พบว่าเมื่อแทนที่โซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ส่งผลให้สมบัติของวัสดุลดลงอย่างเห็นได้ชัด ยกตัวอย่างเช่น ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 ผลการทดสอบพบว่าเมื่อแทนที่บอแรกซ์แบบบอบแห้งที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงจาก 38.1 เมกะปาสคาล เหลือเพียง 36.4, 35.2 และ 27.3 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่แทนที่ด้วยบอแรกซ์แบบไม่อบแห้งพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกันมาก และจากผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำพบว่า มีความสอดคล้องกันทั้งหมด โดยเมื่อแทนที่บอแรกซ์แบบไม่อบแห้งที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าปริมาณโพรงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.5 เป็น 15.8, 16.1 และ 16.3 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้พฤติกรรมข้างต้นนี้พบว่าปริมาณบอแรกซ์ที่ผสมเพิ่ม ทำให้วัสดุมีความสามารถในการกระจายแรงต่ำลง ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของพื้นผิวตัวอย่าง BASG ที่มีความเรียบมากกว่า และรอยแตกร้าวน้อยกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุประเภทบอโรลูมินซิลิเกต (BASG) ให้คุณสมบัติต่ำกว่าวัสดุประเภทลูมินซิลิเกต (ASG) นั้นเอง

จากการทดสอบทั้งหมดพบว่าอัตราส่วน (NS+borax)/NH ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเท่ากับ 0.5 และแทนที่โซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์แบบไม่อบ แต่เนื่องจากที่อัตราส่วน (NS+borax)/NH เท่ากับ 0.5 ให้สมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ค่อนข้างต่ำ จึงนำมาเสริมกำลังด้วยเถ้าแกลบ ผลการทดสอบการเสริมกำลังด้วยเถ้าแกลบพบว่า กำลังรับแรงอัด และ กำลังรับแรงดัดที่สูงสุดเมื่อผสมเถ้าแกลบร้อยละ 4.8 และแทนที่บอแรกซ์แบบไม่อบร้อยละ 20 (0.5-NB20-4.8RHA) โดยกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่ได้อยู่ที่ 58.6 และ 6.3 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และยังสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (1-NB0) ได้ถึงร้อยละ 65.2 โดยจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray diffraction (XRD) พบว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าแกลบมีการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เจลมากกว่า CSH ที่บริเวณ 24° และ 30° (2-Theta) และยังพบว่ามี Quartz ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ SiO_2 เพิ่มขึ้นอีกด้วยจึงสรุปได้ว่าการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เจลที่ได้จากเถ้าแกลบสามารถพัฒนาคุณสมบัติวัสดุได้

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบทั้งหมดพบว่าปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คือ อัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับวัสดุประเภทลูมินซิลิเกต (ASG) คือ 4.09 และอัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวอย่าง BASG คือ 4.08-4.12

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุเชื่อมประสานประเภทจีโอโพลีเมอร์ซึ่งแทนที่โซเดียมซิลิเกตด้วยบอแรกซ์และเสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วสามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลของจีโอโพลีเมอร์ได้ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุเพิ่มเติม อาทิเช่น ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) และความสามารถในการทนกรดซัลเฟต (Sulfate resistance) เป็นต้น



บรรณานุกรม

- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.
- An, J., & Xue, X. (2014). Life cycle environmental impact assessment of borax and boric acid production in China. *Journal of Cleaner Production*, 66, 121–127.
- ASTM International. (2013). ASTM C642-13: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete .,
- ASTM International. (2015). ASTM C1437: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.
- ASTM International. (2016). ASTM C109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
- ASTM International. (2019). ASTM C348-19: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
- Bagheri, A., Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2018). Fibre-reinforced boroaluminosilicate geopolymers: A comparative study *Ceramics International*, 16599-16605.
- Bagheri, A., Nazari, A., Sanjayan, J. G., & Rajeev, P. (2017). Alkali activated materials vs geopolymers: Role of boron as an eco-friendly replacement. *Construction and Building Materials*, 146, 297-302.
- Bagheri, A., Nazari, A., Sanjayan, J. G., Rajeev, P., & Duan, W. (2017). Fly ash-based boroaluminosilicate geopolymers: Experimental and molecular simulations. *Ceramics International*, 43(5), 4119-4126.
- Baumert, K., Herzog, T., & Pershing, J. (2005). Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy.
- Duxson, P., Provis, J., Lukey, G., Mallicoat, S., Kriven, W., & Van Deventer, J. (2005). Understanding the Relationship Between Geopolymer Composition Microstructure And Mechanical Properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269, 47-58.
- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*,

32, 142-147.

- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 467-472.
- Kang, S.-H., Hong, S.-G., & Moon, J. (2019). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 115, 389-400.
- Kaur, K., Singh, J., & Kaur, M. (2018). Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 169, 188-192.
- Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S. (2016). Effects of Alkaline Solution on Properties of the HCFA Geopolymer Mortars. *Procedia Engineering*, 148, 710-717.
- Metha, P. K. (2002). Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. *Concrete International*, 23-28.
- Nazari, A., Maghsoudpour, A., & Sanjayan, J. G. (2014). Characteristics of borosilicate geopolymer. *Construction and Building Materials*, 70, 262-268.
- Shi, C., Krivenko, P. V., & Roy, D. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN: Taylor & Francis.
- 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.
- Uboluk Rattanasak และ Prinya Chindapasirt. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.
- Williams, R. P., & van Riessen, A. (2011). Development of alkali activated borosilicate inorganic polymers (AABSIP). *Journal of the European Ceramic Society*, 31(8), 1513-1516.
- Xu, W., Lo, T. Y., & Memon, S. A. (2012). Microstructure and reactivity of rich husk ash. *Construction and Building Materials*, 29, 541-547.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., . . . Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and

applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.

กระทรวงพาณิชย์ กรมการค้าต่างประเทศ. (2561). การส่งออกข้าวไทยปี 2561. Retrieved from

<http://www.thairiceinfo.go.th>

จิรภัทร ขำญาติ. (2546). วิจัยถั่วลอ่ยๆ ประโยชน์สู่ภาคอุตสาหกรรม. *Engineering Today*, 3.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2553). ถั่วลอ่ยในงานคอนกรีต. ขอนแก่น :: ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูล

ฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2552). ถั่วแกลบในงานคอนกรีต.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY





ตารางที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุบอโรซิลิโคนซิลิเกตจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบอบ (ข้อมูลดิบ)

ส่วนผสม		No.	ขนาดและน้ำหนัก					ความแข็งแรง		
(NS+B)/NH	บอแรกซ์อบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)	
1	Activators/ash	0	1	5.07	5.00	5.10	282.84	151.07	59.59	63.42
			2	5.03	5.00	5.00	284.86	95.16	37.83	
			3	5.20	5.10	5.00	273.06	178.54	67.25	
		10	1	4.96	5.00	5.20	268.00	152.06	61.25	63.16
			2	5.00	5.00	5.00	266.00	162.85	65.07	
			3	5.20	5.00	5.00	261.00	135.38	52.02	
		20	1	5.00	4.90	5.00	280.00	112.72	45.96	43.06
			2	5.10	5.00	5.00	289.00	102.51	40.16	
			3	5.00	5.00	4.90	279.00	87.60	35.01	
30	1	5.00	5.00	5.00	277.15	62.00	24.77	25.60		
	2	4.90	5.00	4.90	278.40	64.55	26.32			
	3	5.00	5.00	5.00	272.06	64.35	25.72			

ส่วนผสม		No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง			
(NS+B)/NH	บอแรกซ์ อบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)	
0.75	Activators/ash	0	1	5.08	5.10	5.00	287.5	142.30	54.93	56.79
			2	5.06	5.07	5.00	279.9	150.50	58.66	
			3	5.10	5.09	5.01	290.3	125.60	48.38	
		10	1	5.15	5.00	5.00	291.30	131.40	50.98	54.59
			2	4.98	5.05	5.00	277.31	146.50	58.19	
			3	5.00	5.05	5.00	275.86	80.00	31.65	
		20	1	4.95	5.10	5.15	285.56	67.90	26.87	41.17
			2	4.95	5.00	5.00	284.34	102.00	41.17	
			3	4.95	5.00	5.00	277.20	83.20	33.58	
30	1	5.10	5.00	5.05	273.27	72.70	28.48	35.60		
	2	5.00	5.00	5.00	283.33	92.90	37.12			
	3	5.00	4.85	5.00	273.52	82.70	34.07			

ส่วนผสม		No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง			
(NS+B)/NH	บอแรกซ์ อบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)	
0.5	Activators/ash	0	1	4.99	4.98	5.00	273.3	112.40	45.23	38.14
			2	5.05	5.03	5.05	275.2	101.30	39.88	
			3	4.99	5.13	5.05	269.9	93.20	36.41	
		10	1	5.05	5.00	4.90	274.60	88.10	34.86	36.43
			2	5.00	4.90	5.00	272.19	93.20	38.00	
			3	5.05	5.00	5.05	281.29	104.10	41.19	
		20	1	5.00	5.10	5.05	286.01	68.90	26.99	35.16
			2	4.90	5.20	5.10	283.94	110.50	43.32	
			3	4.95	5.00	5.10	276.23	64.60	26.07	
30	1	5.10	5.25	5.05	293.02	89.70	33.47	27.31		
	2	5.10	5.10	5.05	286.23	64.60	24.81			
	3	4.95	5.00	5.10	274.88	58.60	23.65			

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุบอโรซิลิโคนไฮดรอกซีโพลีเมอร์ที่ผสมบอแรกซ์แบบไม่อบ (ข้อมูลดิบ)

ส่วนผสม		No.	ขนาดและน้ำหนัก					ความแข็งแรง		
(NS+B)/NH	Activators/ash		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)	
1	0.6	10	1	5.19	5.12	5.20	305.41	117.10	44.10	45.7
			2	5.03	5.05	5.01	282.29	120.20	47.3	
			3	5.17	5.15	5.11	300.46	87.40	32.8	
		20	1	5.07	5.03	5.14	285.58	89.10	34.9	39.6
			2	5.15	5.14	5.20	303.96	117.20	44.3	
			3	5.00	5.05	5.00	278.34	108.50	43.0	
		30	1	5.05	5.09	5.13	286.34	66.13	25.7	25.7
			2	5.21	5.23	5.25	310.21	57.20	21.0	
			3	5.30	5.25	5.05	297.20	57.30	20.6	
0.75	0.6	10	1	5.13	5.10	5.07	281.30	110.10	42.08	42.08
			2	5.07	5.09	5.10	278.90	88.70	34.37	
			3	5.15	5.13	5.20	293.79	82.70	31.30	

ส่วนผสม		No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง			
(NS+B)/NH	บอแรกซ์ ไมเอบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)	
0.75	Activators/ash	20	1	5.05	5.21	5.05	286.64	84.50	32.12	32.12
			2	5.03	5.27	5.15	299.36	60.20	22.71	
			3	5.17	5.28	5.05	293.64	59.10	21.65	
	0.6	30	1	5.15	5.27	5.15	302.06	66.70	24.58	24.66
			2	5.15	5.11	5.05	282.83	65.40	24.85	
			3	5.09	5.12	5.34	295.63	64.00	24.56	

ส่วนผสม		No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง			
(NS+B)/NH	Activators/ash		บอแรกซ์ ไม่อบ (%)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
0.5		1	10	5.00	5.00	5.00	276.81	75.30	30.12	37.56
		2	10	5.00	5.25	4.82	282.76	98.60	37.56	
		3	10	5.25	5.00	5.00	283.88	61.70	23.50	
0.6		1	20	5.00	5.00	5.05	274.2	86.20	34.48	35.63
		2	20	4.85	4.95	5.00	265.14	88.30	36.78	
		3	20	5.00	5.00	5.02	276.08	97.30	38.92	
		1	30	5.00	5.00	5.00	281.2	64.30	25.72	25.72
		2	30	5.00	4.95	5.02	279.41	85.80	34.67	
		3	30	5.00	5.00	5.00	277.77	73.30	29.32	

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างผสมบอแรกซ์แบบบอแรกซ์และเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ)

(NS+B)/NH	ส่วนผสม			No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง		
	Activators/ash	บอแรกซ์ (%)	เถ้าแกลบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
1	0.6	0	0	1	5.05	5.01	5.00	286.50	141.50	55.93	60.49
				2	4.98	5.07	5.00	278.60	152.70	60.48	
				3	5.06	5.00	5.00	277.70	164.60	65.06	
0.75	0.6	0	0	1	5.08	5.10	5.00	278.60	142.30	54.93	56.79
				2	5.06	5.07	5.00	278.00	150.50	58.66	
				3	5.10	5.09	5.00	280.00	125.60	48.38	
0.5	0.6	0	0	1	4.99	4.98	5.00	269.20	112.40	45.23	38.14
				2	5.05	5.03	5.00	278.90	101.30	39.88	
				3	4.99	5.13	5.00	281.00	93.20	36.41	
0.5	0.6	0	3.6	1	5.06	5.06	5.00	276.56	157.50	55.93	60.48
				2	5.21	5.07	5.05	285.65	185.60	60.48	
				3	4.80	5.11	5.10	269.92	145.80	65.06	
0.5	0.6	10	3.6	1	5.01	5.02	5.01	276.44	105.50	54.93	49.42
				2	5.10	5.10	5.05	286.87	128.50	58.66	
				3	4.92	5.05	5.06	275.79	118.70	48.38	

ส่วนผสม			ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง				
(NS+B)/NH	Activators/ash	บอแรกซ์ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0	20	3.6	1	5.00	4.95	5.05	276.38	117.70	47.56	47.98
				2	5.05	5.00	5.00	283.03	122.20	48.40	
				3	5.00	5.10	5.00	284.24	96.40	37.80	
0.5	0.6	30	3.6	1	5.05	4.99	5.01	276.32	83.50	33.14	45.19
				2	5.00	5.19	5.05	283.58	95.00	36.61	
				3	5.05	5.07	5.00	279.23	115.07	45.19	
				4	5.15	5.01	5.02	285.59	91.70	30.52	
				5	5.10	5.01	5.02	279.85	81.70	31.98	
0.5	0	40	4.8	1	5.05	5.05	5.05	286.50	142.00	55.68	55.78
				2	5.02	4.91	5.00	278.56	123.70	50.19	
				3	5.05	5.10	5.10	280.26	143.90	55.87	
0.5	0	10	4.8	1	5.05	4.91	5.07	293.25	119.60	48.23	49.51
				2	5.07	5.06	5.10	287.08	107.40	41.86	
				3	5.05	5.10	5.09	291.59	130.80	50.79	
0.5	0	20	4.8	1	4.95	5.00	5.00	278.64	105.90	42.79	56.67
				2	5.00	5.00	5.00	280.84	110.60	44.24	

ส่วนผสม			ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง				
(NS+B)/NH	Activators/ash	บอแรกซ์ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	20	4.8	3	4.95	4.85	5.00	271.82	165.90	69.1	49.94
				1	5.00	5.00	4.95	288.43	117.30	46.9	
				2	5.05	5.00	5.05	292.28	133.70	53.0	
0.5	0.6	30	4.8	3	5.05	5.00	5.00	286.06	91.40	36.2	50.32
				1	5.03	5.03	5.02	276.47	135.90	53.7	
				2	5.08	5.10	5.09	273.41	133.70	51.6	
0.5	0.6	10	6	3	5.14	5.17	5.04	285.86	130.30	49.0	52.14
				1	5.05	5.00	5.00	285.73	132.00	52.3	
				2	5.05	4.95	4.95	284.15	144.50	57.8	
0.5	0.6	20	6	3	5.00	5.00	5.00	287.97	13.00	52.0	47.29
				1	4.95	5.30	4.98	288.95	125.20	47.7	
				2	4.95	5.15	4.99	282.88	119.50	46.9	
0.5	0.6	30	6	3	5.00	5.00	5.00	281.98	118.20	47.3	54.77
				1	5.05	5.05	5.00	285.37	145.00	56.9	
				2	5.00	5.00	5.00	282.77	117.10	46.8	
0.5	0.6	30	6	3	5.10	4.95	5.00	286.62	133.00	52.7	54.77

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างผสมบอแรกซ์แบบไม่ยอบและเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ)

(NS+B)/N	ส่วนผสม			No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง		
	Activators/ ash	บอแรกซ์ไม่ยอบ (%)	เถ้าแกลบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
1				1	5.07	5.00	5.10	282.84	151.07	59.59	60.49
				2	5.03	5.00	5.00	284.86	95.16	37.83	
				3	5.20	5.10	5.00	273.06	178.54	67.25	
0.75	0.6	0		1	5.08	5.10	5.00	278.60	142.30	54.93	56.79
				2	5.06	5.07	5.00	278.00	150.50	58.66	
				3	5.10	5.09	5.00	280.00	125.60	48.38	
0.5				1	4.99	4.98	5.00	269.20	112.40	45.23	38.14
				2	5.05	5.03	5.00	278.90	101.30	39.88	
				3	4.99	5.13	5.00	281.00	93.20	36.41	
0.5	0.6	3.6	0	1	5.06	5.06	5.00	276.56	157.50	55.93	60.48
				2	5.21	5.07	5.05	285.65	185.60	60.48	
				3	4.80	5.11	5.10	269.92	145.80	65.06	

ส่วนผสม			No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง			
(NS+B)/N H	Activators/ ash	บอแรกซ์ไม่อบ (%)		เถ้าแกลบ (%)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	10	3.6	1	5.00	5.05	5.00	283.30	111.20	44.04	49.42
				2	4.80	5.00	5.00	273.20	121.30	50.54	
				3	5.05	4.85	5.05	273.10	118.30	48.30	
		20	3.6	1	5.00	5.00	5.05	287.50	119.60	47.84	47.84
				2	4.95	5.00	4.95	282.10	155.70	62.91	
				3	5.00	5.00	5.00	282.40	101.80	40.72	
		30	3.6	1	4.90	4.90	4.95	288.50	111.40	46.40	46.96
				2	5.00	4.95	5.00	291.40	117.60	47.52	
				3	5.00	5.00	5.00	285.90	129.20	51.68	
0	4.8	1	5.05	5.05	5.05	286.50	142.00	55.68	53.91		
		2	5.02	4.91	5.00	278.50	123.70	50.19			
		3	5.05	5.10	5.10	280.26	143.90	55.87			
10	4.8	1	4.95	5.00	5.05	286.80	137.70	55.64	56.70		
		2	4.95	5.05	5.10	283.00	118.90	47.56			

ส่วนผสม				No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง				
(NS+B)/N H	Activators/ ash	บอแรกซ์ไม่อบ (%)	เถ้าแกลบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)		
0.5	0.6	10	4.8	3	5.00	4.90	5.00	288.00	141.50	57.76			
				1	5.00	5.10	5.11	285.00	141.90	55.65			
				2	5.05	5.06	5.16	284.90	107.90	42.23	58.63		
						3	4.95	5.20	5.20	283.80	158.60	61.62	
						1	5.00	4.95	6.00	299.80	126.70	51.19	
						2	4.95	4.90	4.98	299.80	140.10	57.76	51.28
						3	5.00	5.05	5.00	301.80	113.10	44.79	
						1	5.03	5.03	5.02	276.40	135.90	53.71	
						2	5.08	5.10	5.09	273.40	133.70	51.61	50.32
		0	6	3	5.14	5.17	5.04	285.80	130.30	49.03			
		10	6	1	5.00	5.00	5.00	289.20	136.20	54.48			
2	4.90			4.95	5.00	292.80	153.70	63.37	50.92				
3	5.00			5.05	5.00	287.50	119.60	47.37					

ส่วนผสม				No.	ขนาดและน้ำหนัก				ความแข็งแรง		
(NS+B)/N H	Activators/ ash	บอแรกซ์ไม่อบ (%)	เถ้าแกลบ (%)		กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	นน. (g)	แรง (kN)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	20	6	1	4.95	5.00	5.05	286.00	152.80	61.74	49.66
				2	5.05	5.00	5.00	283.00	125.40	49.66	
				3	5.00	5.00	5.05	291.50	177.60	71.04	
	30	6	1	5.05	5.00	5.00	281.20	129.60	51.33	52.18	
			2	5.10	5.00	5.00	289.70	129.10	50.63		
			3	5.05	5.00	4.95	276.00	133.90	53.03		

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์ไม่อบ (ข้อมูลดิบ)

(NS+borax)/NaOH=1			
	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	277.00	268.63	274.66
	266.02	278.26	280.43
	280.69	262.13	267.00
b-น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g)	296.45	289.08	296.70
	284.67	298.72	302.13
	300.34	281.88	287.93
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	298.70	291.60	298.80
	286.30	301.10	304.40
	302.30	284.20	289.70
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	166.90	163.30	166.40
	160.30	168.60	167.90
	169.60	159.40	161.60
การดูดซึมน้ำ (%)	7.02	7.61	8.02
	7.01	7.35	7.74
	7.00	7.53	7.84
ค่าเฉลี่ย (%)	7.01	7.48	7.87
ปริมาณโพรง (%)	16.46	17.90	18.23
	16.10	17.24	17.56
	16.28	17.68	17.72
ค่าเฉลี่ย (%)	16.28	17.61	17.84

(NS+borax)/NaOH=0.75			
	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	257.30	260.71	279.74
	276.32	282.48	259.65
	259.72	275.47	259.26
b-น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g)	277.92	280.93	302.27
	297.91	304.39	281.18
	280.23	296.72	280.83
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	280.70	283.60	305.20
	300.70	307.10	283.50
	282.20	299.40	284.60
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	155.60	157.80	169.50
	167.70	170.70	158.00
	158.00	166.80	158.20
การดูดซึมน้ำ (%)	8.01	7.76	8.05
	7.81	7.76	8.29
	7.90	7.71	8.32
ค่าเฉลี่ย (%)	7.91	7.74	8.19
ปริมาณโพรง (%)	18.70	18.20	18.80
	18.30	18.00	19.00
	18.10	18.00	20.00
ค่าเฉลี่ย (%)	18.38	18.05	19.40

(NS+borax)/NaOH=0.5			
	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	258.93	255.92	260.49
	270.61	266.19	253.14
	264.07	261.76	266.56
	270.60	270.80	281.70
	274.40	266.50	270.10
	264.80	268.40	272.40
b-น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g)	274.47	271.41	276.04
	286.96	282.13	268.10
	279.66	277.57	282.34
	287.60	287.30	298.40
	291.00	282.70	286.00
	281.30	284.50	288.80
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	278.60	275.80	280.70
	290.80	286.60	272.80
	283.20	282.20	287.30
	290.40	290.80	301.90
	294.50	286.20	289.50
	285.00	288.20	292.00
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	155.30	152.90	156.20
	162.20	158.40	151.90
	158.10	156.40	160.00
	161.20	161.60	169.10
	163.10	159.60	161.70
	157.10	160.20	163.30
การดูดซึมน้ำ (%)	6.00	6.05	5.97
	6.04	5.99	5.91
	5.90	6.04	5.92
	6.28	6.09	5.93

(NS+borax)/NaOH=0.5			
	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
	6.05	6.08	5.89
	6.23	6.00	6.02
ค่าเฉลี่ย (%)	6.09	6.04	5.94
ปริมาณโพรง (%)	16.00	16.20	16.20
	15.70	15.90	16.30
	15.30	16.20	16.30
	15.30	15.50	15.20
	15.30	15.60	15.20
	15.80	15.50	15.20
ค่าเฉลี่ย (%)	15.82	16.11	16.28

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ผสมบอแรกซ์อบ (ข้อมูลดิบ)

(NS+borax)/NaOH=1				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	282.56	268.66	272.12	243.40
	282.34	259.33	262.95	253.34
	272.37	258.94	274.71	248.92
b-น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g)	297.41	283.00	287.10	261.20
	297.07	276.00	277.60	270.40
	286.73	273.00	288.90	266.50
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	298.8	284.30	289.97	264.45
	298.9	277.90	280.31	274.20
	288.3	274.30	291.39	270.50
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	167.9	154.80	162.20	143.80
	167.8	152.70	151.80	149.00
	162.3	149.70	160.00	146.90
การดูดซึมน้ำ (%)	5.26	5.34	5.50	7.31
	5.22	6.43	5.57	6.73
	5.27	5.43	5.17	7.06
ค่าเฉลี่ย (%)	5.26	5.38	5.54	7.04
ปริมาณโพรง (%)	12.4	12.10	14.00	17.40
	12.6	14.80	13.50	16.70
	12.6	12.30	12.70	17.50
ค่าเฉลี่ย (%)	12.56	13.08	13.39	17.19

(NS+borax)/NaOH=0.75				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	269.15	273.06	272.88	260.85
	261.01	271.25	261.90	270.52
	263.10	268.12	262.56	268.99
b-น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g)	287.34	286.02	287.93	275.78
	276.09	286.49	276.88	285.21
	278.00	280.74	277.56	283.88
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	286.40	289.24	292.10	280.30
	278.10	290.15	280.90	289.60
	279.90	284.28	281.40	288.30
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	160.90	160.00	163.20	153.40
	156.30	160.60	155.70	160.10
	156.90	156.00	156.90	160.10
การดูดซึม (%)	6.76	4.75	5.52	5.72
	5.78	5.62	5.72	5.43
	5.66	4.71	5.71	5.54
ค่าเฉลี่ย (%)	6.07	5.62	5.72	5.72
ปริมาณโพรง (%)	13.70	12.50	14.90	15.30
	14.00	14.60	15.20	14.70
	13.70	12.60	15.10	15.10
ค่าเฉลี่ย (%)	13.81	13.24	15.15	15.19

(NS+borax)/NaOH=0.5				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	269.01	261.4	268.22	267.29
	273.85	269.68	248.70	259.27
	270.92	258.04	259.03	259.89
b-น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g)	285.97	282.08	288.57	287.88
	290.92	290.16	265.40	279.14
	287.64	272.06	278.98	279.85
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	289.20	285.92	293.16	292.33
	293.60	293.94	269.84	283.17
	290.20	275.57	282.75	284.09
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	161.30	157.80	161.40	159.80
	164.60	162.60	148.20	155.50
	163.30	151.60	155.20	155.00
การดูดซึม (%)	6.30	7.91	7.59	7.70
	6.23	7.59	6.71	7.66
	6.17	5.43	7.70	7.68
ค่าเฉลี่ย (%)	6.24	6.98	7.33	7.68
ปริมาณโพรง (%)	15.80	19.10	18.90	18.90
	15.30	18.50	17.40	18.70
	15.20	14.10	18.60	18.70
ค่าเฉลี่ย (%)	15.49	16.31	18.30	18.79

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบปริมาณโพรงและดูดซึมน้ำเมื่อแทนที่ด้วยบอแรกซ์แบบอบแห้ง และ เสริมกำลังด้วยเถ้ากลบ (ข้อมูลดิบ)

0.5 - RHA 3.6				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	277.43	272.09	265.40	274.06
	277.75	275.77	268.90	268.65
	267.65	273.71	266.40	268.72
				274.60
				266.80
				278.00
b-น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g)	291.9	288.04	280.50	286.98
	292.00	291.20	284.60	281.28
	282.00	286.32	282.80	282.02
				289.80
				281.70
				293.70
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	294.10	288.00	282.20	290.60
	294.20	290.70	286.50	284.00
	284.60	289.70	284.70	284.90
				292.40
				284.50
				296.40
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	163.80	162.00	156.90	161.10
	162.20	163.50	159.10	157.00
	158.00	163.30	158.40	158.50
				163.40
				158.90
				165.40
การดูดซึมน้ำ (%)	5.22	5.86	5.69	4.71
	5.13	5.60	5.84	4.70

0.5 - RHA 3.6				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
	5.36	4.61	6.16	4.95
				5.54
				5.58
				5.65
ค่าเฉลี่ย (%)	5.24	5.35	5.89	5.62
ปริมาณโพรง (%)	12.80	12.60	13.40	12.80
	12.50	11.70	13.80	12.10
	13.40	12.70	14.50	12.80
				13.80
				14.10
				14.00
ค่าเฉลี่ย (%)	12.63	12.64	13.61	14.07

0.5 - RHA 4.8				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	265.84	272.94	268.20	273.80
	270.74	278.96	258.20	276.60
	265.81	275.32	263.60	275.10
b-น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g)	279.10	287.26	283.20	289.20
	285.18	295.10	272.90	291.80
	280.45	291.53	279.00	290.60
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	281.80	288.30	285.00	290.70
	286.60	294.40	274.20	293.20
	282.60	291.10	280.20	292.10
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	157.30	161.50	158.20	162.40
	158.10	166.00	151.90	164.20
	156.10	163.70	155.40	163.00
การดูดซึมน้ำ (%)	4.99	5.25	5.59	5.62
	5.33	5.79	5.69	5.50
	5.51	5.89	5.84	5.63
ค่าเฉลี่ย (%)	5.28	5.64	5.71	5.58
ปริมาณโพรง (%)	12.80	12.10	13.20	13.20
	12.30	12.00	13.10	12.90
	13.30	12.40	13.30	13.20
ค่าเฉลี่ย (%)	12.81	12.17	13.21	13.17

0.5 - RHA 6				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	279.57	271.67	274.60	270.94
	278.28	275.87	263.00	266.61
	275.32	270.97	276.30	274.16
b-น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g)	295.92	285.57	291.00	284.70
	295.38	292.83	279.00	280.10
	293.19	285.06	292.80	288.20
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	297.50	289.20	292.50	288.20
	296.50	293.40	280.40	283.70
	293.10	288.10	294.10	292.00
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	166.00	162.40	163.20	160.60
	165.50	165.40	156.80	158.00
	163.40	161.50	164.30	162.50
การดูดซึมน้ำ (%)	5.85	5.12	5.97	5.08
	6.14	6.15	6.08	5.06
	6.49	5.20	5.97	5.12
ค่าเฉลี่ย (%)	6.16	5.49	6.01	5.09
ปริมาณโพรง (%)	13.60	13.80	13.80	13.50
	13.90	13.70	14.10	13.60
	13.70	13.50	13.70	13.80
ค่าเฉลี่ย (%)	13.75	13.68	13.88	13.63

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบปริมาณโพรงและดูดซึมน้ำเมื่อแทนที่ด้วยบอแรกซ์แบบไม่อบ และ เสริมกำลังด้วยเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ)

0.5 - RHA 3.6				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	277.43	266.40	268.20	259.20
	277.75	265.40	272.20	260.90
	267.65	270.40	281.60	264.30
b-น้ำหนักกั้มตัวผิวแห้ง (g)	291.90	283.60	283.80	274.70
	292.00	282.40	288.50	276.30
	282.00	287.30	298.50	279.90
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	288.00	285.90	285.40	276.90
	290.70	284.50	290.10	278.50
	289.70	289.20	300.50	281.70
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	162.00	158.50	159.70	153.60
	163.50	158.50	163.20	154.20
	163.30	161.30	168.00	156.80
การดูดซึมน้ำ (%)	5.22	6.46	5.82	5.98
	5.13	6.41	5.99	5.90
	5.36	6.25	6.00	5.90
ค่าเฉลี่ย (%)	5.24	6.43	5.94	5.93
ปริมาณโพรง (%)	8.40	15.30	13.70	14.40
	10.20	15.20	14.10	14.20
	17.40	14.70	14.30	13.90
ค่าเฉลี่ย (%)	12.00	15.05	14.02	14.15

0.5 - RHA 4.8				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	265.84	260.10	274.70	279.30
	270.74	271.90	267.40	281.50
	265.81	270.50	270.80	282.50
			272.40	
			272.40	
			266.70	
b-น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g)	279.10	276.50	290.00	296.00
	285.18	288.90	282.60	298.60
	280.45	287.50	285.30	299.20
			289.10	
			288.70	
			282.60	
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	281.80	277.60	290.80	297.30
	286.60	290.40	283.70	300.40
	282.60	288.90	286.10	300.40
			290.90	
			291.00	
			284.80	
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	157.30	153.80	161.10	155.50
	158.10	161.70	157.80	167.40
	156.10	161.30	159.20	167.20
			162.30	
			161.70	
			158.60	
การดูดซึมน้ำ (%)	4.99	6.31	5.57	5.98
	5.33	6.25	5.68	6.07
	5.51	6.28	5.35	5.91
			6.13	

0.5 - RHA 4.8				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
			5.98	
			5.96	
ค่าเฉลี่ย (%)	5.42	6.27	5.78	5.99
ปริมาณโพรง (%)	12.80	14.10	12.40	12.70
	12.30	14.40	12.90	14.20
	13.30	14.40	12.10	13.40
			14.40	
			14.40	
			14.30	
ค่าเฉลี่ย (%)	12.81	14.31	13.42	14.21

0.5 - RHA 6				
	Control	Borax 10%	Borax 20%	Borax 30%
a-น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	279.57	276.90	270.30	273.60
	278.28	271.30	288.00	275.10
	275.32	270.90	274.30	275.00
b-น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g)	295.92	293.80	287.20	290.20
	295.38	289.20	306.00	291.90
	293.19	287.40	291.50	291.70
c-น้ำหนักในอากาศ (g)	297.50	295.20	288.30	291.00
	296.50	290.30	307.10	292.60
	293.10	288.90	292.90	292.50
d-น้ำหนักในน้ำ (g)	166.00	165.20	159.90	162.50
	165.50	162.20	170.40	162.50
	163.40	161.60	162.20	162.30
การดูดซึมน้ำ (%)	5.85	6.10	6.25	6.07
	6.14	6.60	6.25	6.11
	6.49	6.09	6.27	6.07
ค่าเฉลี่ย (%)	6.32	6.60	6.26	6.08
ปริมาณโพรง (%)	13.60	14.10	14.00	13.50
	13.90	14.80	14.00	13.50
	13.70	14.10	14.20	13.40
ค่าเฉลี่ย (%)	13.75	14.35	14.07	13.48

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างซีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมบอแรกซ์ไม้ออบและเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ)

(NS+B)/NH	Activators/ash	บอแรกซ์ไม้ออบ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
1	0.6	0	0	1	3.95	4.02	12.00	210.00	5.81	5.86
				2	3.96	4.00	12.00	212.00	5.91	
				3	4.01	4.08	12.00	206.00	5.45	
1	0.6	10	0	1	4.01	4.09	11.98	206.00	5.41	5.18
				2	3.95	3.95	11.90	200.00	5.68	
				3	3.97	4.01	11.96	170.00	4.69	
1	0.6	20	0	1	4.10	4.00	11.91	140.00	3.74	4.99
				2	4.00	3.90	11.90	170.00	4.89	
				3	3.96	4.00	11.51	190.00	5.08	
1	0.6	30	0	1	4.00	4.05	12.42	170.00	4.74	4.78
				2	3.99	4.05	12.15	194.00	5.30	
				3	3.97	4.05	12.56	170.00	4.83	
0.75	0.6	0	0	1	4.13	4.12	12.00	198.00	4.99	5.04
				2	4.11	4.03	12.00	170.00	4.50	
				3	4.03	4.04	12.00	190.00	5.10	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บดแรกซีเมนต์ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
0.75	0.6	10	0	1	4.11	4.15	12.20	180.00	4.60	4.72
				2	3.94	3.95	12.11	168.00	4.90	
				3	4.03	4.13	12.37	162.00	4.30	
0.75	0.6	20	0	1	4.00	4.08	12.47	144.00	4.00	4.05
				2	4.06	4.11	12.15	140.00	3.60	
				3	4.00	4.08	12.31	152.00	4.10	
0.75	0.6	30	0	1	4.00	4.07	12.16	142.00	3.80	3.68
				2	4.00	4.10	12.55	128.00	3.50	
				3	4.03	4.07	12.20	98.00	2.60	
0.5	0.6	0	0	1	4.03	4.00	12.00	180.00	4.90	4.87
				2	4.05	4.02	12.00	178.00	4.80	
				3	4.09	4.03	12.00	194.00	5.20	
0.5	0.6	10	0	1	4.00	4.00	12.00	128.00	3.50	4.62
				2	4.00	4.00	11.70	190.00	5.10	
				3	4.00	4.00	12.00	150.00	4.10	
0.5	0.6	20	0	1	4.00	4.00	12.00	158.00	4.40	4.36
				2	4.00	4.00	12.30	192.00	5.40	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บดแรงกึ่งไม่อบ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
				3	4.00	4.00	12.40	172.00	4.90	
0.5	0.6	30		1	4.00	4.00	12.00	132.00	3.60	3.68
				2	4.00	4.00	12.50	150.00	4.30	
				3	4.00	4.00	12.00	134.00	3.70	



ตารางที่ 19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างซีโอไฟลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมบอแรกซ์อบและเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ)

(NS+B)/NH	Activators/ash	บอแรกซ์อบ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังดัด (MPa)	กำลังดัดเฉลี่ย (MPa)
1	0.6	0	0	1	3.95	4.02	12.00	210.00	5.81	5.86
				2	3.96	4.00	12.00	212.00	5.91	
				3	4.01	4.08	12.00	206.00	5.45	
1	0.6	10	0	1	4.10	4.00	12.10	210.00	5.70	6.00
				2	3.90	4.00	11.90	224.00	6.30	
				3	4.00	4.00	12.00	260.00	7.20	
1	0.6	20	0	1	4.00	4.00	13.20	180.00	5.51	5.70
				2	4.00	4.00	12.30	210.00	5.92	
				3	3.80	4.02	12.00	240.00	6.93	
1	0.6	30	0	1	3.90	4.10	11.60	196.00	5.12	5.20
				2	3.90	4.00	12.40	180.00	5.35	
				3	4.00	4.00	12.30	200.00	5.73	
0.75	0.6	0	0	1	4.13	4.12	12.00	198.00	5.00	5.00
				2	4.11	4.03	12.00	170.00	4.51	
				3	4.03	4.04	12.00	190.00	5.12	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บอแรกซ์ชอบ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
0.75	0.6	10	0	1	4.03	4.00	12.00	180.00	4.91	4.90
				2	4.05	4.02	12.00	178.00	4.82	
				3	4.09	4.03	12.00	194.00	5.20	
0.75	0.6	20	0	1	4.12	4.00	12.00	175.00	4.72	4.70
				2	4.12	3.88	12.40	179.00	5.30	
				3	4.13	3.92	12.00	168.00	4.73	
0.75	0.6	30	0	1	4.07	4.07	11.50	175.00	4.41	4.60
				2	4.17	4.14	14.00	170.00	4.90	
				3	4.27	4.14	12.20	206.00	5.10	
0.5	0.6	0	0	1	4.03	4.00	12.00	179.00	4.90	4.90
				2	4.05	4.02	12.00	185.00	5.01	
				3	4.09	4.03	12.00	177.00	4.71	
0.5	0.6	10	0	1	4.10	3.80	12.10	170.00	5.00	5.00
				2	4.00	4.00	12.00	176.00	4.92	
				3	4.00	3.95	12.20	178.00	5.10	
0.5	0.6	20	0	1	4.00	3.96	11.93	180.00	5.10	4.90
				2	4.00	3.95	11.93	188.00	4.90	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บดแรกกซ์ซ็อบ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
				3	4.05	4.05	12.10	176.00	4.70	
0.5	0.6	30	0	1	4.00	4.00	12.00	163.00	4.51	4.42
				2	4.00	4.05	12.00	166.00	4.62	
				3	4.10	4.00	12.00	154.00	4.21	
0.5	0.6	0	3.6	1	4.10	4.00	12.10	230.00	6.20	6.40
				2	4.00	4.00	12.00	225.00	6.22	
				3	4.00	3.95	12.20	240.00	6.91	
0.5	0.6	10	3.6	1	4.05	4.07	12.00	214.00	5.60	5.76
				2	4.10	4.12	12.00	246.00	6.21	
				3	4.02	4.05	12.00	220.00	5.96	
0.5	0.6	20	3.6	1	4.00	3.95	11.93	198.00	5.60	5.60
				2	4.10	4.10	12.10	240.00	6.21	
				3	4.05	4.05	12.10	210.00	5.60	
0.5	0.6	30	3.6	1	4.10	4.09	12.10	172.00	4.51	4.83
				2	4.15	4.09	12.00	190.00	4.81	
				3	4.10	4.10	12.35	143.00	3.80	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บดแรกกซ์ซอบ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	0	4.8	1	4.10	3.80	12.10	175.00	5.30	6.10
				2	4.05	4.12	12.50	242.00	6.50	
				3	4.02	4.09	12.35	239.00	6.50	
0.5	0.6	10	4.8	1	4.07	4.05	12.00	200.00	5.29	6.03
				2	4.07	4.05	12.00	194.00	5.13	
				3	4.00	4.05	12.00	224.00	6.03	
0.5	0.6	20	4.8	1	4.00	3.95	12.32	252.00	7.32	6.05
				2	4.00	4.05	12.20	168.00	4.60	
				3	3.98	3.95	11.52	228.00	6.22	
0.5	0.6	30	4.8	1	4.00	4.00	12.10	242.00	6.73	6.15
				2	4.10	3.90	12.30	214.00	6.21	
				3	4.10	4.10	12.10	236.00	6.10	
0.5	0.6	0	6	1	3.90	4.10	12.65	175.00	4.60	5.80
				2	4.13	3.23	12.10	185.00	2.61	
				3	4.08	4.11	12.20	182.00	4.43	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บดแรกกซ์ฮอป (%)	เถ้าแกลลอป (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	10 ฮอป	6	1	4.05	4.00	12.40	190.00	5.35	5.34
				2	3.96	4.02	11.70	162.00	4.36	
				3	3.95	4.05	12.20	192.00	5.32	
0.5	0.6	20	6	1	4.00	4.10	12.20	206.00	5.50	5.88
				2	4.00	3.80	12.40	230.00	7.27	
				3	4.10	4.15	12.00	180.00	4.50	
0.5	0.6	30	6	1	4.00	4.05	12.18	198.00	5.41	6.80
				2	3.95	3.98	12.05	240.00	6.80	
				3	3.92	4.05	12.00	210.00	5.77	

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างซีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมบอแรกซีไม้ออบและเถ้าแกลบ (ข้อมูลดิบ)

(NS+B)/NH	Activators/ash	บอแรกซีไม้ออบ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	0	3.6	1	4.10	4.00	12.10	230.00	6.20	6.40
				2	4.00	4.00	12.00	225.00	6.22	
				3	4.00	3.95	12.20	240.00	6.91	
0.5	0.6	10	3.6	1	4.10	4.00	11.70	208.00	5.46	5.95
				2	4.15	4.10	12.40	210.00	5.49	
				3	4.00	4.00	12.10	248.00	6.90	
0.5	0.6	20	3.6	1	4.00	4.00	12.40	212.00	6.04	5.68
				2	4.00	4.10	12.35	210.00	5.68	
				3	4.05	3.90	12.35	260.00	7.67	
0.5	0.6	30	3.6	1	4.02	4.00	12.20	192.00	5.36	5.25
				2	4.05	4.00	12.00	210.00	5.72	
				3	4.05	3.95	12.00	184.00	5.14	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บดแรกซีเมนต์ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	0	4.8	1	4.10	3.80	12.10	175.00	5.30	6.10
				2	4.05	4.12	12.50	242.00	6.50	
				3	4.02	4.09	12.35	239.00	6.50	
0.5	0.6	10	4.8	1	4.05	4.00	12.40	178.00	5.01	6.12
				2	4.00	4.00	12.10	220.00	6.12	
				3	4.00	3.95	11.40	192.00	5.16	
0.5	0.6	20	4.8	1	3.90	4.00	11.40	230.00	6.20	6.30
				2	4.00	4.10	12.35	245.00	6.62	
				3	4.10	4.00	12.35	250.00	6.91	
0.5	0.6	30	4.8	1	3.90	4.00	12.20	190.00	5.11	5.80
				2	4.10	3.90	12.40	210.00	6.12	
				3	4.00	4.10	12.50	225.00	5.81	
0.5	0.6	0	6	1	3.90	4.10	12.65	175.00	4.60	5.80
				2	4.13	3.23	12.10	185.00	2.61	
				3	4.08	4.11	12.20	182.00	4.43	

(NS+B)/NH	Activators/ash	บดแรกซีเมนต์ (%)	เถ้าแกลบ (%)	No.	กว้าง (cm.)	ลึก (cm.)	ยาว (cm.)	แรง (kg)	กำลังตัด (MPa)	กำลังตัดเฉลี่ย (MPa)
0.5	0.6	10	6	1	4.00	4.00	12.20	139.00	3.90	5.35
				2	4.00	4.05	12.40	183.00	5.09	
				3	3.95	4.00	12.40	194.00	5.60	
0.5	0.6	20	6	1	4.00	3.90	12.40	232.00	6.96	5.75
				2	4.05	3.90	12.10	174.00	5.03	
				3	4.00	4.10	12.00	200.00	5.25	
0.5	0.6	30	6	1	3.85	4.00	12.30	205.00	6.02	5.93
				2	4.10	4.00	11.60	210.00	5.46	
				3	4.00	4.00	12.10	210.00	5.84	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย กิตต์ จันทรประสิทธิ์
วัน เดือน ปี เกิด	13 พฤษภาคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย (กำลังศึกษาอยู่)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY