

## สมบัติทางกลและโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยที่ใช้เศษยางรถยนต์เป็นมวลรวมละเอียด

อาบีเต็ง ฮาวา<sup>1\*</sup> ปรีชา สะแลแม<sup>2</sup> ชุลกิปลี มามะ<sup>1</sup> ชุลกิปลี เดมะ<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ ต.โคกเคียน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 96000

และ วรพจน์ ประชาเสรี<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ถ.กาญจนวณิช อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

\* Corresponding Author: abideng.hawa@gmail.com

<sup>1</sup> อาจารย์ หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>3</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

### ข้อมูลบทความ

### บทคัดย่อ

#### ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 31 พฤษภาคม 2564

แก้ไข : 15 พฤศจิกายน 2564

ตอบรับ : 17 มีนาคม 2565

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.8

#### คำสำคัญ :

โครงสร้างระดับจุลภาค /

จีโอพอลิเมอร์ / เศษยาง / อิฐบล็อก

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงสมบัติทางกลและโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยที่ใช้เศษยางที่ได้จากยางรถยนต์เก่าเป็นมวลรวมละเอียด วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ถูกผลิตจากเถ้าลอยผสมด้วยสารละลายโซเดียมซิติเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้ ศึกษาผลกระทบของ 1) อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย 2) น้ำต่อเถ้าลอย และ 3) เศษยางต่อเถ้าลอย ที่มีต่อสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราดและทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน ผลการทดสอบพบว่า การใช้เศษยางทำให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ลดลง ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เศษยางอย่างเดียวยู่ในช่วง 1,134-1,345 กก.ม.<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติ ดังนั้น จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เศษยางอย่างเดียวจึงสามารถนำไปใช้ผลิตอิฐบล็อกที่ไม่รับน้ำหนักได้

---

## Mechanical Properties and Microstructure of Fly Ash based Geopolymer Using Crumb Rubber as Fine Aggregates

Abideng Hawa<sup>1\*</sup> Preecha Salaemae<sup>2</sup> Sulkiflee Mama<sup>1</sup> Zulkiflee Dema<sup>1</sup>

Princess of Naradhiwas University, Khok Khian, Mueang, Narathiwat 96000

and Woraphot Prachasaree<sup>3</sup>

Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Karnjanavanich Road, Hat Yai, Songkhla 90110

\* Corresponding Author: [abideng.hawa@gmail.com](mailto:abideng.hawa@gmail.com)

<sup>1</sup> Lecturer, Infrastructure and Materials Innovation Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Infrastructure and Materials Innovation Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

---

### Article Info

#### Article History:

Received: May 31, 2021

Revised: November 15, 2021

Accepted: March 17, 2022

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.8

---

#### Keywords:

Microstructure /

Geopolymer /

Crumb Rubber / Blocks

### Abstract

This study focused on investigating mechanical properties and microstructure of fly ash geopolymer mortar with 100% recycled tire crumb rubber as fine aggregates. Geopolymer binder was produced from fly-ash mixed with sodium silicate and sodium hydroxide solutions. The effects of 1) alkaline solution to fly ash ratio 2) water to fly ash ratio and 3) crumb rubber to fly ash ratio on mechanical properties, including compressive strength, density, water absorption and microstructure via the use of scanning electron microscopy were investigated. Energy dispersive X-ray spectroscopy were used to analyze elemental compositions of the samples. The results showed that using crumb rubber led to a decrease in the compressive strength of the geopolymer samples. The density of geopolymer samples with 100% crumb rubber ranged between 1,134-1,345 kg/m<sup>3</sup>, which was lower than that of normal cement mortars. Thus, the geopolymer with 100% crumb rubber has potential to be used to prepare blocks for non-load applications.

---

## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีปริมาณรถยนต์สะสมประมาณ 19.5 ล้านคัน [1] และใน พ.ศ. 2563 มีการจดทะเบียนรถยนต์ใหม่ป้ายแดงประมาณ 2.6 ล้านคัน [2] ซึ่งแน่นอนว่าการใช้รถยนต์นั้นต้องมีการสึกหรอของยางทำให้ต้องมีการเปลี่ยนยางใหม่ ส่งผลให้ในแต่ละปีมีปริมาณยางรถยนต์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และมีจำนวนมากที่ไม่มีการกำจัดทิ้งอย่างถูกวิธี ถึงแม้ยางรถยนต์บางส่วนถูกนำมาปรับปรุงให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถือว่ายังส่วนน้อย และส่วนใหญ่ไม่สามารถนำกลับมาปรับปรุงใช้งานใหม่ ทำให้ยางรถยนต์เป็นขยะที่มีปริมาณมากและมีการย่อยสลายยาก ปัจจุบัน มีการนำยางรถยนต์เก่ามาย่อยให้มีขนาดเล็กเพื่อใช้โรยบนสนาม พื้นหญ้าเทียมของสนามฟุตบอล ยางรถยนต์ดังกล่าวมีขนาดเท่าเม็ดทราย ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าจะสามารถนำมาแทนทรายบางส่วนในการผสมคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะทางกายภาพของยางรถยนต์ที่มีความยืดหยุ่น ไม่ได้มีความแข็งแรงเท่าทรายหรือหินอาจจะเป็นข้อจำกัดของการผลิตคอนกรีตที่มีความแข็งแรงรับแรงได้มากเหมือนคอนกรีตปกติทั่วไป แต่อาจไม่มีข้อจำกัดสำหรับคอนกรีตที่ไม่ต้องรับแรงอย่างคอนกรีตสำหรับผนัง โดยการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาไม่ว่าจะเป็นซีเมนต์คอนกรีต [3-4] หรือจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต [5-6] หรือแม้กระทั่งมอร์ตาร์ [7-8] ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาที่เป็นการแทนที่บางส่วน

เศษยางรถยนต์บดยังถูกนำไปศึกษาในการใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการผลิตจีโอพอลิเมอร์โดยการเข้าไปแทนที่บางส่วนของทรายแม่น้ำ เช่น การศึกษาของ Wongsa และคณะ [9] ที่มีการใช้เศษยางรถยนต์บดในการแทนที่ทรายเพื่อผลิตจีโอพอลิเมอร์ จากการทดสอบ พบว่า การเพิ่มเศษยางรถยนต์มากขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตาม การใช้เศษยางรถยนต์บด

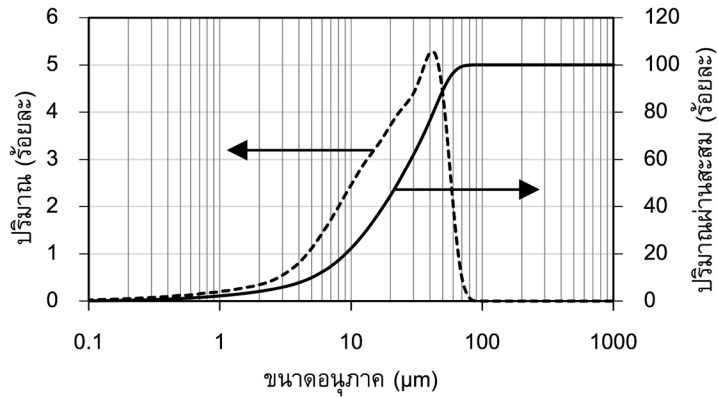
ในกรณีใช้เศษยางเพียงอย่างเดียวสามารถช่วยให้ความหนาแน่นและการนำความร้อนลดลงร้อยละ 42 และ 79 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการผลิตอิฐเพื่อเป็นฉนวน เช่นเดียวกับกับการศึกษาของ Zaetang และคณะ [10] ซึ่งทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยที่ใช้เศษยางรถยนต์บดในการแทนที่ทราย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้เศษยางรถยนต์มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อใช้เศษยางรถยนต์เป็นมวลรวมทั้งหมดพบว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ได้ 27.5 กก./ซม.<sup>2</sup> และจะทำให้ความหนาแน่นลดลง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเป็นการใช้เศษยางรถยนต์เข้าไปแทนที่มวลรวมละเอียด ไม่ว่าจะเป็นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์หรือคอนกรีตและซีเมนต์คอนกรีตปกติ

ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการใช้เศษยางรถยนต์บดแทนที่ทรายทั้งหมด โดยศึกษาอิทธิพลของสารอัลคาไลน์ปริมาณมวลรวม และปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเพื่อผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ศึกษาสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด และทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน เพื่อเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษยางรถยนต์มาใช้ในงานวัสดุก่อสร้าง ซึ่งอาจจะเป็นผนังหรืออิฐบล็อก

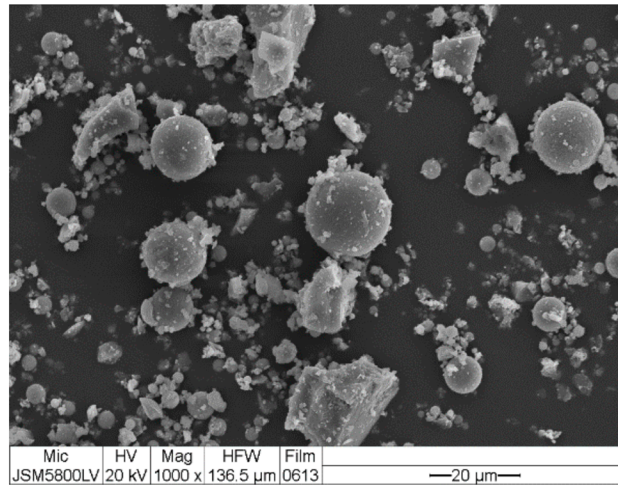
## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 วัสดุวิจัย

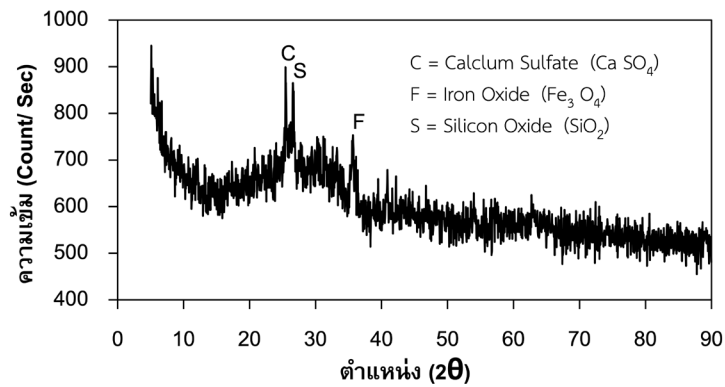
เถ้าลอย (FA) จากโรงปูนคอนกรีตผสมเสร็จ มีขนาดอนุภาค ซึ่งทดสอบโดยใช้ Laser particle size analyzer (COULTER LS 230, USA) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงถึงปริมาณผ่านสะสม (ลูกศรชี้ทาง



รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าลอย



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคเถ้าลอย



รูปที่ 3 องค์ประกอบแร่ของเถ้าลอย

ขวา) และปริมาณ (ลูกศรชี้ไปทางซ้าย) และเมื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเชิงลึกด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; JSM-5800LV, JEOL, Japan) ดังรูปที่ 2 พบว่าลักษณะแก้วลอยมีอนุภาคทรงกลมจำนวนมากหลายขนาด ซึ่งเป็นส่วนของ  $\text{SiO}_2$  สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีรวมถึงผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่ดังรูปที่ 3 ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectrometry โดยใช้เครื่องมือ X-ray fluorescence spectrometer (PW2400, PHILIPS, Netherlands) และผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่องมือ X-Ray Diffractometer (X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands) ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 3 ตามลำดับ แก้วลอยที่ใช้มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 41.29 อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 16.91 และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 9.24 และมีแคลเซียมออกไซด์สูงถึงร้อยละ 16.75 เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีสามารถจัดให้แก้วลอยอยู่ใน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [11]

เศษยางรถยนต์ย่อยที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 20 เมช และ 40 เมช ผสม 50:50 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่น 452 กก./ม.<sup>3</sup> การดูดซึมน้ำร้อยละ 3.32 และความถ่วงจำเพาะ 1.2

สารละลายอัลคาไลน์ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเกล็ดมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผสมกับโซเดียมซิลิเกต และน้ำ โดยที่โซเดียมซิลิเกตมี ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ร้อยละ

14.85 ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 29.45 และน้ำร้อยละ 55.70 โดยน้ำหนัก

## 2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 2 ซึ่งมีทั้งหมด 18 อัตราส่วนผสม โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามอัตราส่วนผสมแก้วลอยต่อเศษยางรถยนต์ที่ 1:1.2, 1:1.6 และ 1:2.0 อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยเท่ากับ 0.6, 0.8 และ 1.0 และน้ำต่อแก้วลอยเท่ากับ 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนัก ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต 1:2.5 โดยน้ำหนัก โดยเริ่มจากการผสมเศษยางรถยนต์ทั้งสองขนาดเข้าด้วยกันในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก แล้วเติมแก้วลอยผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 3-5 นาที ตั้งทิ้งไว้ ทำการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้าด้วยกัน ผสมจนโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายเป็นของเหลวเนื้อเดียวกันกับโซเดียมซิลิเกต แล้วเติมน้ำเข้าไปจนให้เข้ากัน นำสารละลายเทในเศษยางรถยนต์ที่เตรียมไว้ก่อนหน้า ผสมให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำมอร์ตาร์เหลวเทเข้าแบบหล่อขนาด 50x50x50 มม. กระทั่งตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [12] แล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ นำตัวอย่างเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างออกจากเตาอบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างเริ่มเย็นลง ทำการแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงครบวันทดสอบที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีแก้วลอย

ออกไซด์	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	LOI
ร้อยละ	41.29	16.91	9.24	16.75	2.73	4.77	1.42	1.11	0.96	1.52

### 2.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างขนาด 50x50x50 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [12] โดยเครื่องทดสอบ Automatic compression testing ที่อายุการทดสอบ 1, 7 และ 28 วัน

การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม. ใช้ตัวอย่างที่อายุ 28 วัน นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก (ไม่ผ่านการอบร้อน) จากนั้นเอาตัวอย่าง

แช่น้ำ 1 ยกขึ้นเช็ดผิวให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างแช่น้ำต่ออีก 6 ชม. รวมกับ 1 ชม.แรก ทำต่อที่อายุ 12 และ 24 ชม. นำค่าที่ได้มาคำนวณ ดังสมการ (1)

$$\frac{(B - A)}{A} \times 100 \quad (1)$$

โดย A = น้ำหนักหลังแช่น้ำที่แต่ละอายุ  
B = น้ำหนักก่อนแช่น้ำ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ต่อแก้วลอย 100 กรัม

สัญลักษณ์	แก้วลอย(กรัม)	โซเดียมซิลิเกต (กรัม)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)	เศษยางรถยนต์ (กรัม)
1.2-4A6	100	42.88	17.15	40	120
1.2-4A8	100	57.15	22.86	40	120
1.2-4A10	100	71.43	28.57	40	120
1.2-6A6	100	42.88	17.15	60	120
1.2-6A8	100	57.15	22.86	60	120
1.2-6A10	100	71.43	28.57	60	120
1.6-4A6	100	42.88	17.15	40	160
1.6-4A8	100	57.15	22.86	40	160
1.6-4A10	100	71.43	28.57	40	160
1.6-6A6	100	42.88	17.15	60	160
1.6-6A8	100	57.15	22.86	60	160
1.6-6A10	100	71.43	28.57	60	160
2-4A6	100	42.88	17.15	40	200
2-4A8	100	57.15	22.86	40	200
2-4A10	100	71.43	28.57	40	200
2-6A6	100	42.88	17.15	60	200
2-6A8	100	57.15	22.86	60	200
2-6A10	100	71.43	28.57	60	200

ในการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคใช้ตัวอย่างจากเศษมอร์ตาร์หลังจากการทดสอบกำลังอัด ทั้งการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 3.1 กำลังอัด

##### 3.1.1 อิทธิพลสารอัลคาไลน์

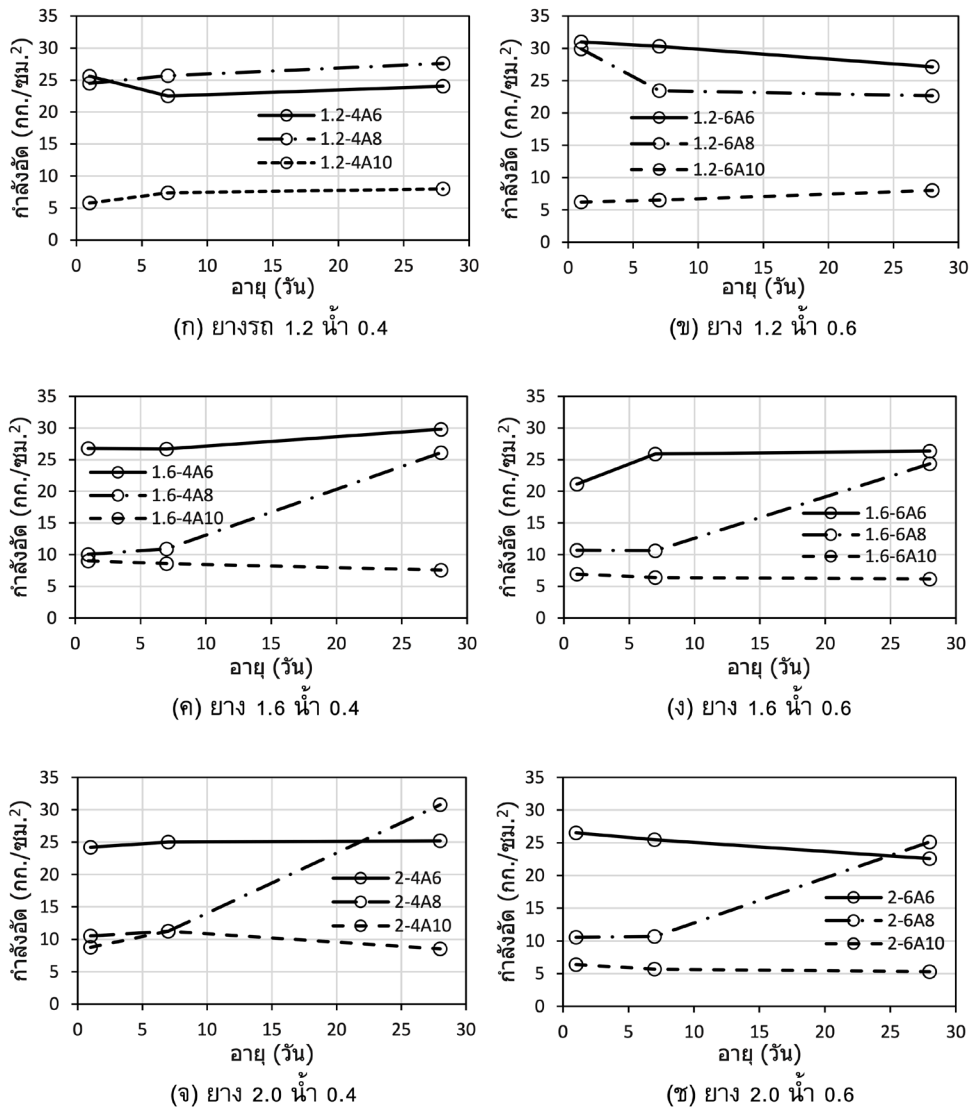
ผลการศึกษากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยและเศษยางรถยนต์ย่อย ที่ได้รับอิทธิพลจากปริมาณของสารอัลคาไลน์ดังรูปที่ 4 พบว่าค่ากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์เมื่อใช้อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยสูงขึ้นมีแนวโน้มกำลังอัดลดลงโดยเฉพาะที่อัตราส่วน 1.0 ที่กำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนในทุกอัตราส่วนผสมและทุกอายุบ่ม อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน 0.6 และ 0.8 ค่ากำลังอัดที่ได้ค่าใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วนผสมที่อายุ 28 วัน อาจเนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและที่อัตราส่วน 1.0 ทำให้มีสารอัลคาไลน์เกินปริมาณที่จำเป็น ซึ่งเป็นไปตามลักษณะผลการทดสอบของ Wongsa และคณะ [13] ที่ใช้อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย 0.65, 0.75 และ 0.85 ซึ่งเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้นกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ลดลง ในการใช้อัตราส่วนเศษยางรถยนต์ย่อยเป็นมวลรวม 1.2 โดยน้ำหนัก กำลังอัดมีค่าสูงตั้งแต่อายุ 1 วัน ทั้งการใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.4 และ 0.6 อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อใช้มวลรวม 1.6 และ 2.0 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารอัลคาไลน์ 0.8 มีค่าน้อยที่อายุ 1 และ 7 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ในการศึกษาของ Hanjitsuwan และคณะ [14] ใช้ของเหลวต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 ในการผสมจีโอพอลิเมอร์เพสต์สามารถ

ให้กำลังอัดสูงถึงประมาณ 571 กก./ซม.<sup>2</sup> Boonserm และคณะ [15] ใช้ดินพินายผสมเถ้าลอยในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ พบว่าการใช้สารละลายต่อวัสดุประสานที่ 0.75 โดยเฉพาะการใช้เถ้าลอยอย่างเดียวสามารถให้กำลังอัด 364 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วัน อย่างไรก็ตามผลการศึกษาของ Wongsa และคณะ [13] ค่ากำลังอัดจะอยู่ในช่วง 23-32 กก./ซม.<sup>2</sup> เมื่อใช้เศษยางรถยนต์เป็นมวลรวมอย่างเดียว ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาคั้งนี้

##### 3.1.2 อิทธิพลน้ำ

รูปที่ 5-7 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แสดงถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย 0.6 ดังรูปที่ 5 เป็นที่น่าสังเกตว่ากำลังอัดสูงตั้งแต่อายุต้น และเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดเกิดขึ้นน้อยมาก และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย พบว่าการใช้น้ำ 0.6 มีแนวโน้มจะให้กำลังอัดลดลงเล็กน้อยทั้งการใช้อัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย 0.6, 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดสอบลักษณะนี้ได้แสดงให้เห็นจากผลการทดสอบที่ผ่านมาของ Wardhono [16] ที่ได้มีการศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งพบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.3-0.5 ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยและจะให้กำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน 0.4 จากผลการทดสอบครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยไม่ได้ผลกระทบหลักต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งแตกต่างกับปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีผลกระทบต่อกำลังอัดเป็นอย่างมาก ในกรณีการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาบละเอียดของ Hawa และคณะ [17] ที่ศึกษาการใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินขาวเผา 0.45, 0.55 และ 0.65 พบ





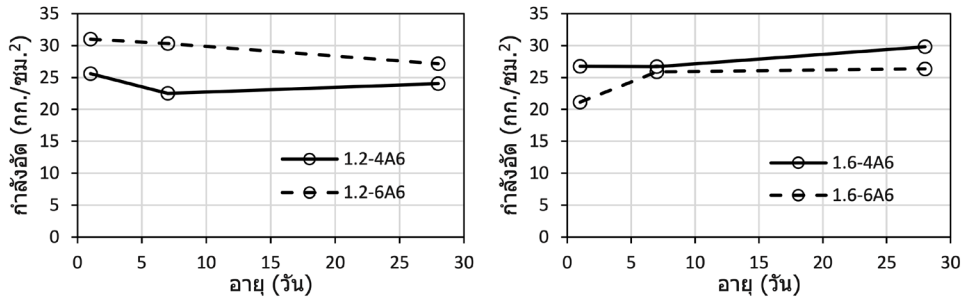
รูปที่ 4 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เปลี่ยนแปลงสารอัลคาไลน์

ว่าอัตราส่วนต่อดินขาวเผา 0.45 และ 0.55 ค่ากำลังอัดที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากตั้งแต่อายุ 2 ซม. ไปจนถึงอายุ 28 วัน ส่วนอัตราส่วน 0.65 ค่ากำลังอัดที่ได้ลดลงเมื่ออายุ 2 ซม. ไปจนถึง 7 วัน แต่ที่อายุ 28 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาจนมีค่าใกล้เคียง

เมื่อพิจารณาตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย 1.0 ดังรูปที่ 7 พบว่ากำลังอัด

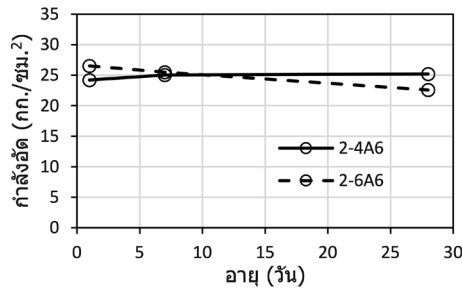
ที่ได้มีค่าน้อยทุกอัตราส่วนผสมและทุกช่วงอายุบ่มตั้งแต่ผลที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่เป็นสิ่งที่น่าสังเกตว่าช่องว่างค่ากำลังอัดระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.4 และ 0.6 เริ่มกว้างขึ้นโดยเฉพาะที่การใช้มวลรวมเศษยางรถยนต์มากขึ้น อาจเนื่องจากการใช้ยางเศษรถยนต์มากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณเถ้าลอยน้อยลงในก้อนตัวอย่างที่เท่ากัน ทำให้ก้อนตัวอย่างเหลวยิ่งขึ้นส่วนหนึ่งมา





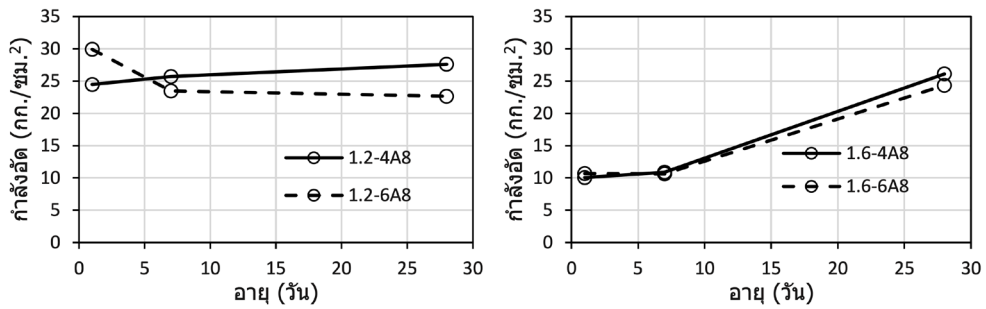
(ก) ยาง 1.2

(ข) ยาง 1.6



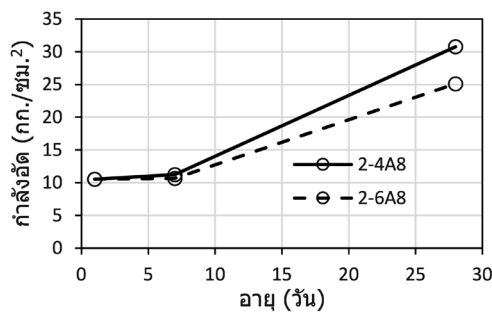
(ค) ยาง 2.0

รูปที่ 5 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สารอัลคาไลน์ 0.6



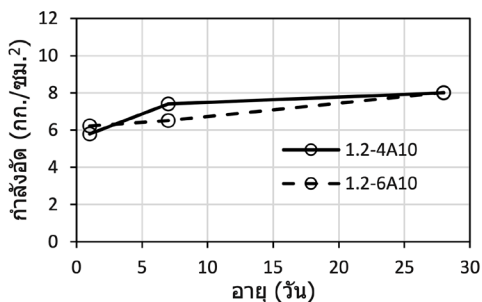
(ก) ยาง 1.2

(ข) ยาง 1.6

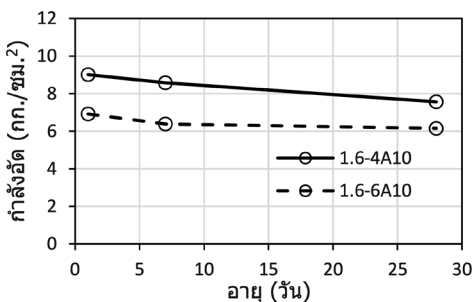


(ค) ยาง 2.0

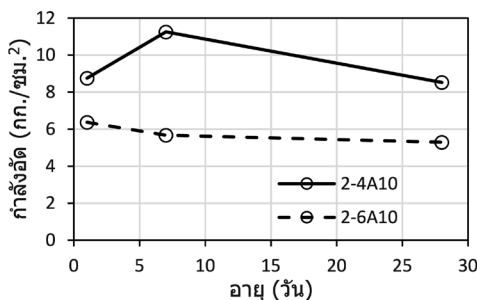
รูปที่ 6 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สารอัลคาไลน์ 0.8



(ก) ย่าง 1.2



(ข) ย่าง 1.6



(ค) ย่าง 2.0

รูปที่ 7 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สารอัลคาไลน์ 1.0

จากสารอัลคาไลน์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโซเดียมซิลิเกต มีน้ำอยู่ร้อยละ 55.70 โดยน้ำหนัก

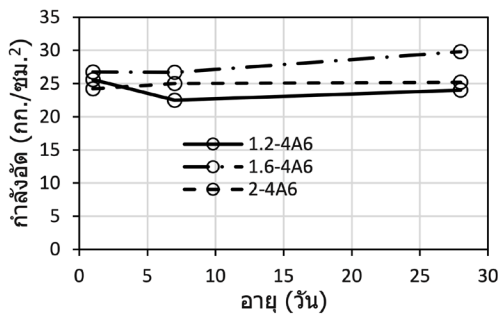
### 3.1.3 อิทธิพลมวลรวม

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณมวลรวมเศษยางรถยนต์ย่อยให้มีขนาดเล็ก โดยการแทนที่ทรายร้อยละ 100 ทุกอัตราส่วนผสม จากผลการทดสอบจะเห็นว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้มวลรวม 1.2, 1.6 และ 2.0 โดยน้ำหนัก กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงในแต่ละชุดตัวแปรโดยเฉพาะที่อายุ 28 วัน อาจเนื่องจากการใช้มวลรวมเศษยางรถยนต์ย่อยปริมาณ 1.2-2.0 ยังเพียงพอต่อความสามารถในการเคลือบผิวของเถ้าลอย กล่าวคือเถ้าลอยสามารถเคลือบผิวหน้ามวลรวมเศษยางรถยนต์ย่อยได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่าง

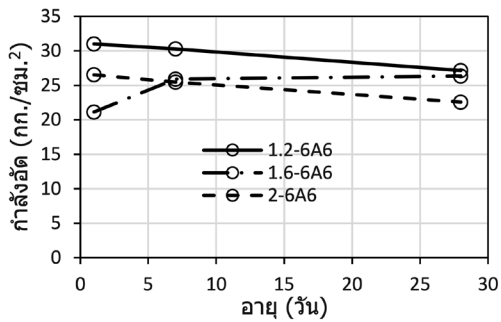
มวลรวมกับเพสต์ยังคงดีอยู่ ส่งผลให้ตัวอย่างยังมีความสามารถรับแรงได้ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของ Wongsa และคณะ [13] ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อเศษยางรถยนต์ 1:0.96 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบด้านกำลังที่ 28 วัน พบว่ากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงอยู่ในช่วง 23-32 กก./ชม.<sup>2</sup> ซึ่งพอจะแสดงให้เห็นว่ามวลรวม 0.96 และ (1.2, 1.6 และ 2.0) มีอิทธิพลต่อกำลังอัดไม่มาก

### 3.2 ความหนาแน่น

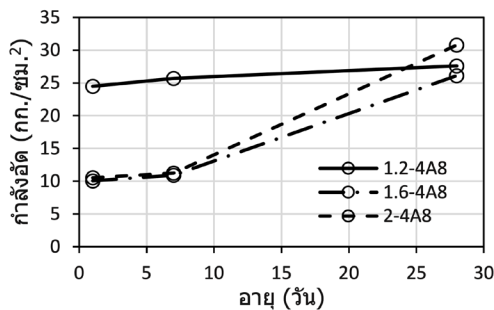
รูปที่ 9 แสดงความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.4 และ 0.6 เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6(ก) พบว่าการใช้อัตราส่วนสารอัลคาไลน์เพิ่มความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกชุดปริมาณมวลรวม ในขณะที่กำลังอัดมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อใช้สารอัลคาไลน์สูง



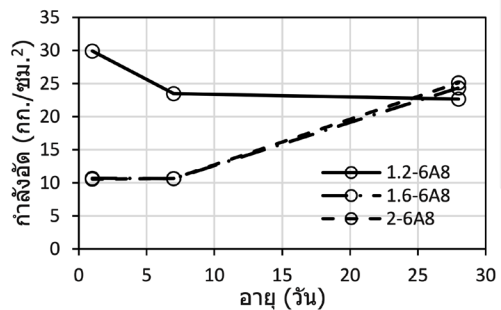
(ก) น้ำ 0.4 สารอัลคาไลน์ 0.6



(ข) น้ำ 0.6 สารอัลคาไลน์ 0.6



(ค) น้ำ 0.4 สารอัลคาไลน์ 0.8



(ง) น้ำ 0.6 สารอัลคาไลน์ 0.8

รูปที่ 8 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เปลี่ยนแปลงมวลรวมยางรถยนต์

ขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อแก้วลอยเท่ากับ 1.0 โดยปกติทั่วไปไม่ว่าด้านปูนซีเมนต์หรือจีโอพอลิเมอร์เมื่อตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสูงค่ากำลังอัดจะมีแนวโน้มสูงตามไปด้วย ในที่นี้พอจะแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของสารอัลคาไลน์ต่อแก้วลอยมีอิทธิพลด้านกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เป็นอย่างมาก และเมื่อพิจารณาจากอิทธิพลของมวลรวมเศษยางรถยนต์ พบว่าเมื่อใช้เศษยางรถยนต์มากขึ้นความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากว่าเศษยางรถยนต์มีความถ่วงจำเพาะน้อยส่งผลให้ความหนาแน่นน้อยตามไปด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อแก้วลอยเป็น 0.6 พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในทุกชุดปริมาณมวลรวม เป็นไปได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำมากขึ้นส่งผลให้สารอัลคาไลน์มีความเหลวมากขึ้นส่งผลให้ก้อนตัวอย่างเหลวในทุกอัตราส่วนผสมทำให้ความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกัน

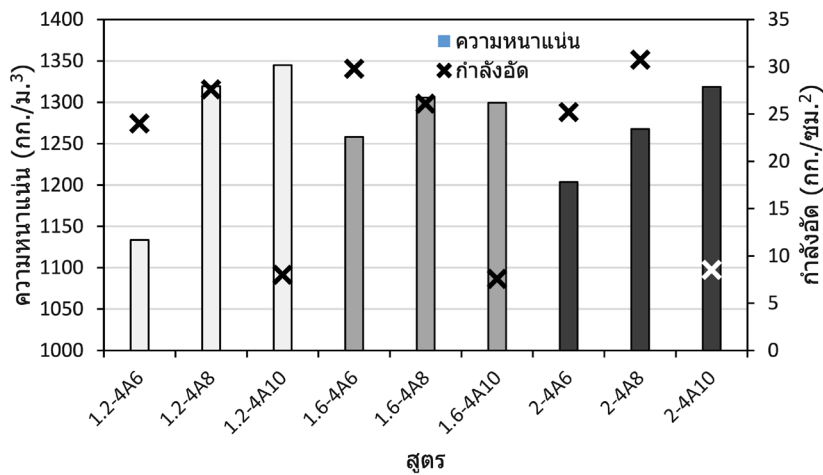
ด้วยความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อยู่ในช่วง 1,134-1,345 กก./ม.<sup>3</sup> นั้น ทำให้เป็นสมบัติที่ดีในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอิฐบล็อกผนังเนื่องจากมีน้ำหนักเบาทำให้โครงสร้างรับน้ำหนักน้อย

### 3.3 การดูดซึมน้ำ

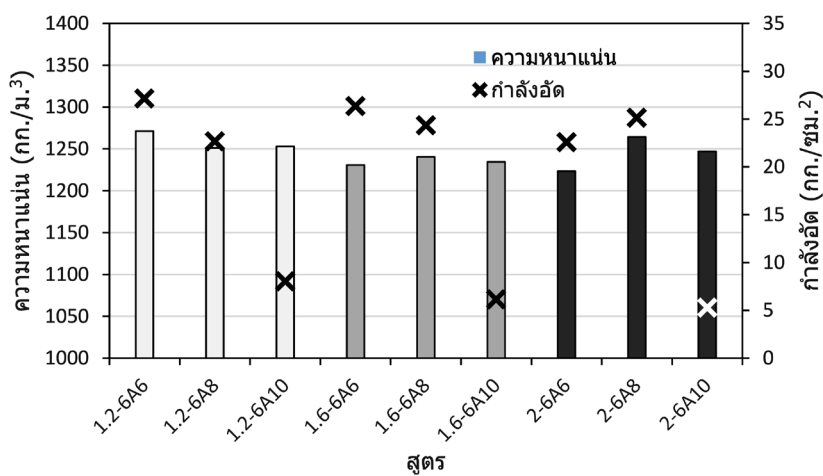
การทดสอบการดูดซึมน้ำจะเลือกอัตราส่วนผสมบางส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดมากกว่า 25 กก./ชม.<sup>2</sup> ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดของการผลิตอิฐบล็อก ซึ่งกำลังอัดและการดูดซึมน้ำเป็นสมบัติที่สำคัญของอิฐบล็อกแบบไม่รับแรง [18] การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างขนาด 50x50x50 มม. ดังรูปที่ 10 ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากระยะเวลาแช่น้ำที่ยาวนานทำให้ก้อนตัวอย่างมี

เวลาในการดูดซึมน้ำมาก เมื่อพิจารณาจากอิทธิพลของมวลรวมเศษยางรถยนต์ย่อยการเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์มากขึ้น จะส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำมากขึ้นโดยเฉพาะที่เศษยางรถยนต์ต่อถั่วลอ่ยเท่ากับ 2:1 โดยน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากว่าเศษยางรถยนต์มีค่าการดูดซึมน้ำสูง เมื่อใช้ปริมาณยางรถยนต์มากจะส่งผลให้เกิดการดูดซึมน้ำมาก เป็นไปตามผลการศึกษาของ อำพา และคณะ [13] ในการ

ศึกษาการดูดซึมน้ำของ Zaetang และคณะ [10] ที่มีการศึกษาการดูดซึมน้ำไปจนถึง 42 วันพบว่าจีโอพอลิเมอร์มวลรวมเศษยางรถยนต์อย่างเดียวมีการดูดซึมน้ำร้อยละ 18.4 และ 24.9 ที่ระยะเวลาแช่น้ำ 7 และ 42 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ยางรถยนต์ย่อยเป็นมวลรวมใช้ระยะเวลานานในการดูดซึมน้ำกว่าจะคงที่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษานี้ที่ระยะเวลาแช่น้ำ 1 วัน (24 ชม.) มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.5 แสดง



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อถั่วลอ่ย 0.4



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อถั่วลอ่ย 0.6

รูปที่ 9 ความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ 28 วัน

ให้เห็นว่าการใช้มวลรวมยางรถยนต์ทดสอบที่ 24 ซม. ได้ค่าการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 30 จะมีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับจีโอพอลิเมอร์หรือซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ทรายเป็นมวลรวมที่การดูดซึมน้ำคงที่ตั้งแต่อายุน้อย และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณน้ำจะพบว่าอัตราส่วนผสมที่ใช้น้ำมากจะมีการดูดซึมน้ำน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้น้ำน้อย เนื่องจากว่าการใช้น้ำในส่วนผสมที่มากจะทำให้เนื้อจีโอพอลิเมอร์มีน้ำมาก เมื่อนำไปแช่น้ำทำให้น้ำจากภายนอกซึมเข้าไปได้น้อย ตรงกันข้ามกับตัวอย่างที่ใช้น้ำในการผสมน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้ปริมาณสารอัลคาไลน์มากขึ้น การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นปัจจัยที่ผลต่อการดูดซึมน้ำอาจจะมีมาจากหลาย ๆ ปัจจัย เพราะหากในตัวอย่างมีความชื้นมากพออยู่แล้ว การดูดซึมน้ำไปในก่อนตัวอย่างจึงลดลงด้วย

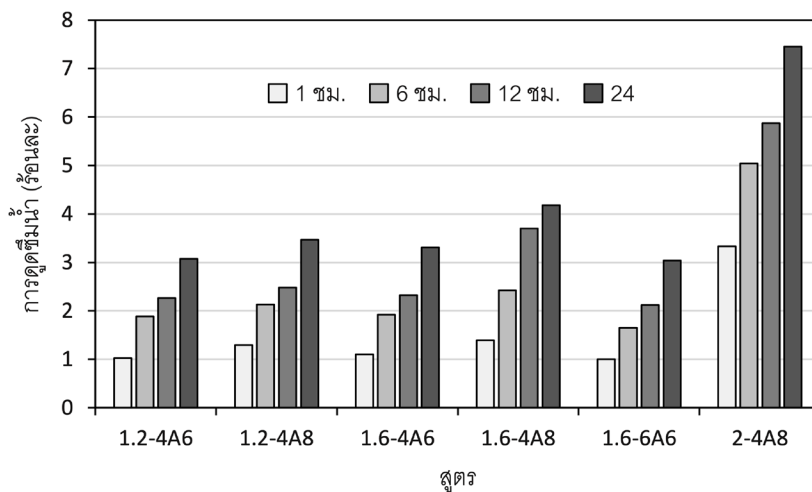
### 3.4 โครงสร้างระดับจุลภาค

#### 3.4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาค

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังรูปที่ 11 แสดงให้เห็นภาพกว้างของเนื้อจีโอพอลิเมอร์อัตราส่วน (ก) 1.6-4A6 และ (ข) 1.6-4A8

ที่มีปริมาณสารอัลคาไลน์ที่แตกต่าง โดยภาพรวมจะพบรูพรุน เล็กน้อยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาทั้ง 2 อัตราส่วนผสม แต่เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของสารอัลคาไลน์พบว่าเมื่อสารอัลคาไลน์มากขึ้นจะมีเศษเนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เชื่อมติดกันจำนวนมากว่า เหล่านี้มันอาจจะเป็นไปได้ว่าไม่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันหรือผ่านแล้วแต่มีการยึดเกาะกันไม่แน่น ทำให้มีลักษณะคล้ายเศษชิ้นส่วนจำนวนมาก (รูปที่ 11(ข)) ซึ่งส่งต่อกำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1.6-4A6 (รูปที่ 11(ก)) และรูปที่ 11(ค) และ 11(ง) แสดงถึงผลของมวลรวมเศษยางรถยนต์ไม่เพียงแต่มีอิทธิพลจากค่าความถ่วงจำเพาะของเศษยางรถยนต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายสูงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง (ค) 1.2-4A8 จะมีเนื้อแน่นมากกว่าตัวอย่าง (ง) 2-4A8 ความแน่นของเนื้อจีโอพอลิเมอร์จะทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น

รูปที่ 12 แสดงลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคเนื้อจีโอพอลิเมอร์อย่างละเอียดด้วยกำลังขยายสูง เพื่อให้เห็นความชัดเจนถึงการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน แสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นดังรูปที่

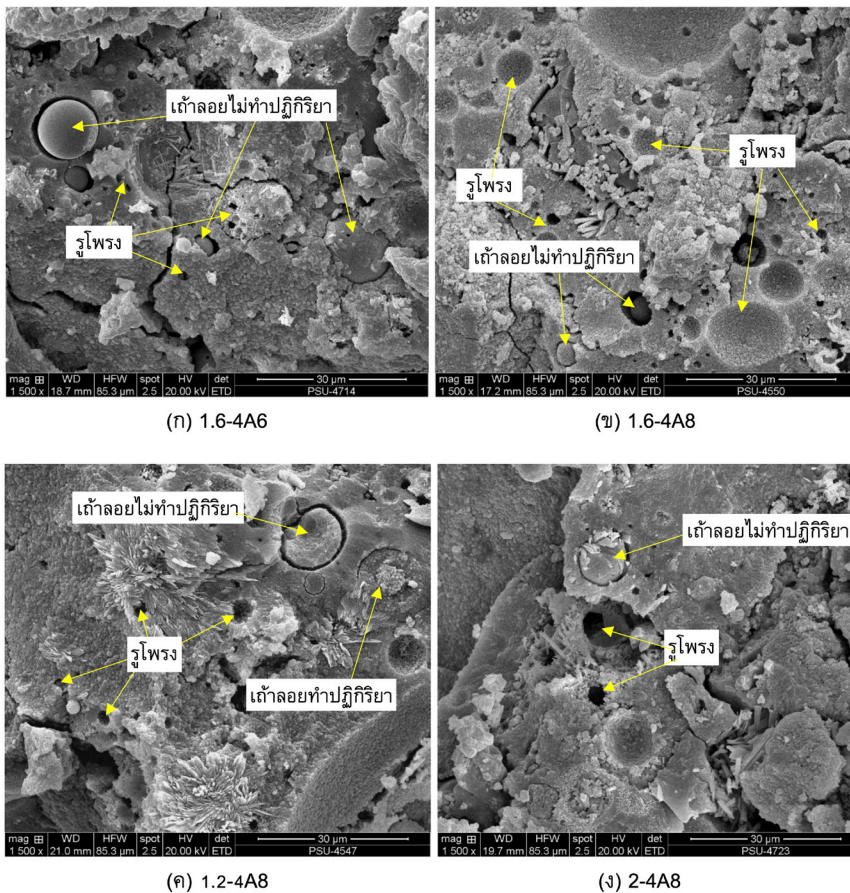


รูปที่ 10 การดูดซึมน้ำจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

12(ก) และ 12(ข) ตามลูกศร และยังสามารถแสดง การเกิดปฏิกิริยาของแก้วลอยโดยเฉพาะในส่วนของ SiO<sub>2</sub> ดังรูปที่ 12(ก) จากก้อนกลมเรียบกลายมาเป็น ก้อนกลมที่มีผิวขรุขระ และยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถ พบการชะละลายของแก้วลอยดังรูปที่ 12(ค) ลักษณะ การชะละลายเป็นไปตามการศึกษาของ Gunasekara [19] แสดงให้เห็นว่าแก้วลอยได้มีการทำปฏิกิริยามา แล้วจึงทำให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัวจนสามารถรับน้ำ หนักได้ ในการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคยังสามารถพบเศษขางรถยนต์ที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียด ดังภาพที่ 12(ง) และ 12(จ)

### 3.4.2 การวิเคราะห์ธาตุ

การวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโทรเมตรี รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) แบบ Mapping analysis ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดังรูป ที่ 13 และตารางที่ 3 เมื่อพิจารณารูปที่ 13 แสดงการ วิเคราะห์แบบ Mapping analysis ของตัวอย่างจีโอ พอลิเมอร์ 1.2-4A8 ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าธาตุที่แสดงอย่างชัดเจนเช่น ซิลิกา (Si) แสดงผล อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก (Fe) ที่พบว่า ไม่ค่อยชัดเจนมากนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับผลใน ตารางที่ 3 ปริมาณธาตุทั้ง 2 มีแตกต่างอย่างชัดเจน

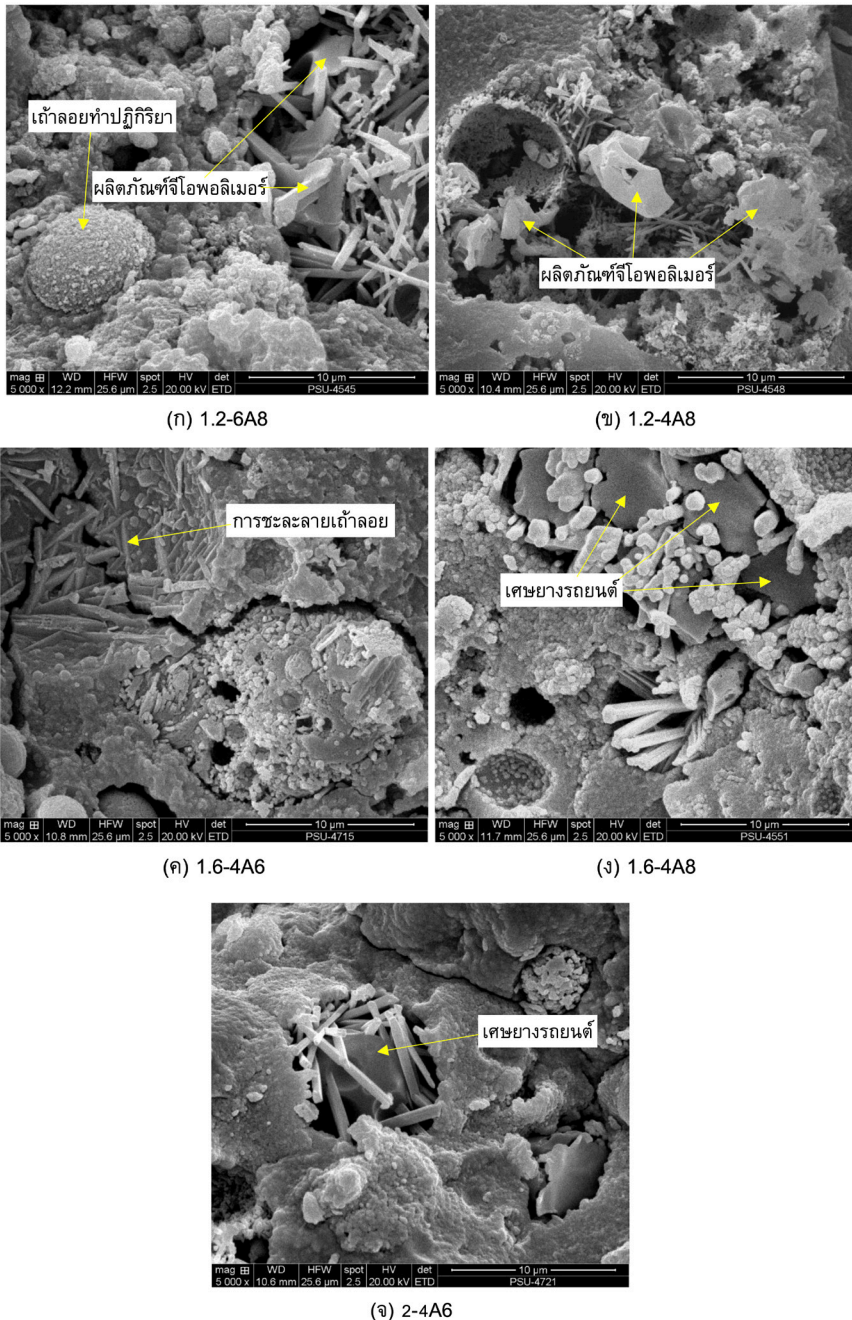


รูปที่ 11 โครงสร้างระดับจุลภาคจีโอพอลิเมอร์ 1,500x



และเมื่อวิเคราะห์ระหว่างอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 3 พบว่าอัตราส่วนผสมที่ใช้สารอัลคาไลน์ 0.8 ทำให้พบโซเดียม (Na) ได้มากกว่า เนื่องจากในสารอัลคาไลน์พบโซเดียมทั้งในโซเดียมซิลิเกตและโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ในปริมาณสูง และเมื่อพิจารณาผลจากเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์มากขึ้นธาตุคาร์บอน (C) ที่วิเคราะห์ได้มีแนวโน้มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากว่า



รูปที่ 12 โครงสร้างระดับจุลภาคอีพอกซีเรซิน 5,000x



ในส่วนประกอบของยางรถยนต์มีผงถ่านเป็นส่วนประกอบหลักถึงร้อยละ 28 โดยในผงถ่านจะมีคาร์บอนเป็นหลัก

จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ พบว่าออกซิเจน ซิลิกอน โซเดียม คาร์บอน แคลเซียม อลูมินา ถูกพบในปริมาณมาก เนื่องจากเป็นธาตุที่ปรากฏในวัสดุผสมจีโอพอลิเมอร์ทั้งที่เป็นวัสดุประสาน สารอัลคาไลน์ และมวลรวม โดยเฉพาะออกซิเจนที่พบในปริมาณมากกว่าธาตุอื่น ๆ นั้น เนื่องจากในองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมจีโอพอลิเมอร์มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบทั้งหมด

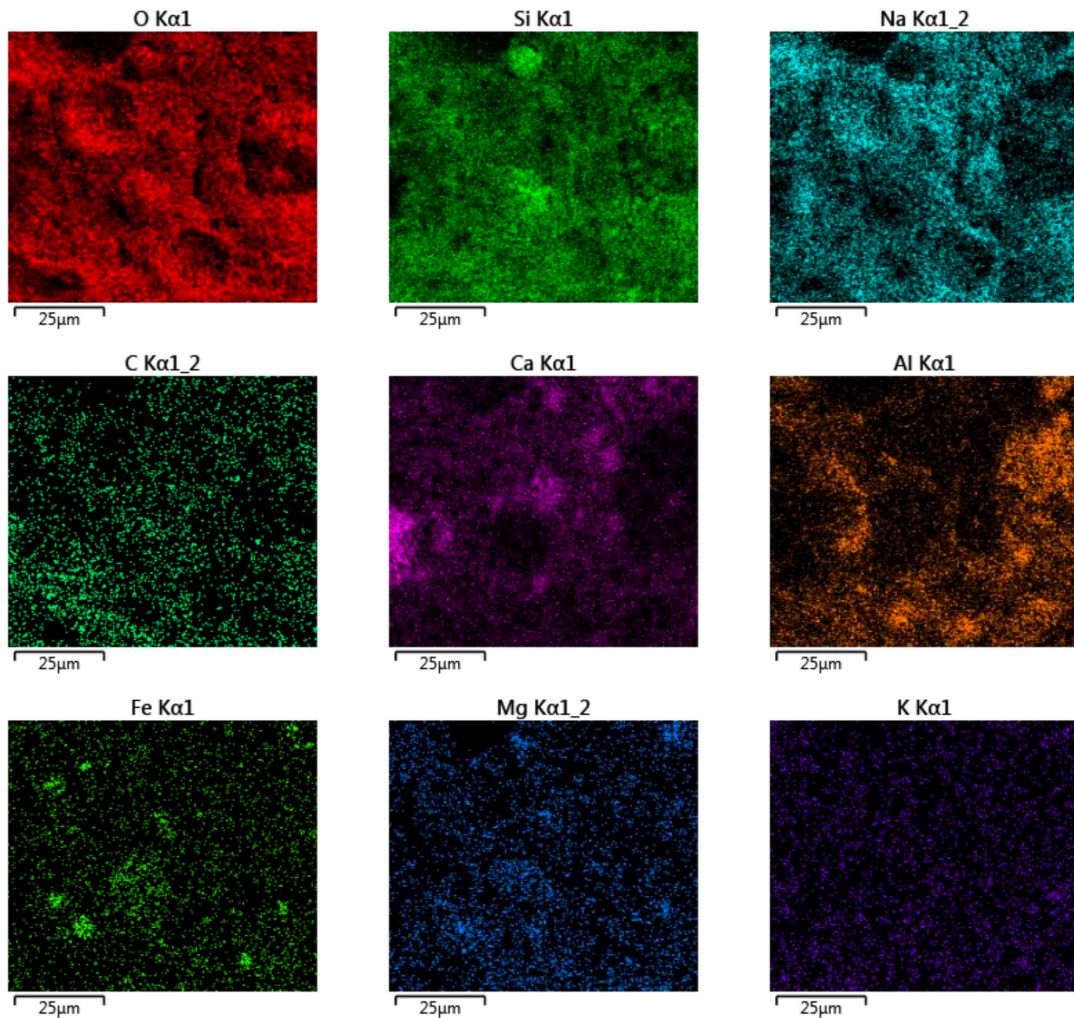
#### 4. สรุปผล

เศษยางรถยนต์ที่ผ่านการย่อยให้มีขนาดเล็กสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย ในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย ถึงแม้ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าน้อยแต่สามารถประยุกต์ใช้กับงานที่ไม่ต้องรับแรงอย่างเช่น ผนัง อิฐบล็อก

1. การใช้อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6-0.8 จะส่งผลดีต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 22.6-30.8 กก./ซม.<sup>2</sup> ในขณะที่อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 1.0 กำลังอัดอยู่ในช่วง 5.3-8.0

#### ตารางที่ 3 ปริมาณธาตุของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย

ธาตุ (ร้อยละ)	1.2-4A8	1.6-6A6	2-4A6	2-4A8
ออกซิเจน (O)	46.8	43.9	41.2	40.8
ซิลิกอน (Si)	15.0	14.5	15.4	11.5
โซเดียม (Na)	10.7	9.5	6.6	11.5
คาร์บอน (C)	11.9	13.9	19.2	15.8
แคลเซียม (Ca)	5.3	5.3	5.7	7.5
อะลูมิเนียม (Al)	5.0	5.7	5.0	2.7
เหล็ก (Fe)	2.3	3.1	3.2	7.3
ซัลเฟอร์ (S)	0.8	1.7	0.9	1.0
แมกนีเซียม (Mg)	0.6	0.7	0.6	0.5
โพแทสเซียม (K)	0.6	0.6	0.8	0.5
ไทเทเนียม (Ti)	0.4	0.4	1.0	0.3
สังกะสี (Zn)	0.4	0.5	0.5	0.5



รูปที่ 13 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis

- กก./ชม.<sup>2</sup> และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อแฉะล่อยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อแฉะล่อยเท่ากับ 0.6 ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน
2. อัตราส่วนน้ำต่อแฉะล่อยเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ลดลง
3. การใช้มวลรวม 1.2-2.0 ไม่ได้มีต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน แต่ที่อายุต้นมวลรวม 1.6 และ 2.0 ให้ค่ากำลังอัดน้อย
4. การเพิ่มขึ้นของเศษยางรถยนต์ที่ผ่านการย่อยมีผลทำให้การดูดซึมน้ำมากขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อแฉะล่อยมากขึ้น การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การใช้อัตราส่วนน้ำที่สูงขึ้นการดูดซึมน้ำจะลดลง
5. ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แฉะล่อยมวลรวมเศษยางรถยนต์ไม่ได้มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัด
6. อิทธิพลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อแฉะล่อย

มีผลต่อกำลังอัดเป็นอย่างมากต่อการศึกษ  
จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ใช้เศษยางรถยนต์  
ผ่านการย่อยเป็นมวลรวมละเอียด ในขณะที่  
การดูดซึมน้ำจะได้รับอิทธิพลจากปริมาณมวล  
รวมมากที่สุด

จากผลการทดสอบสมบัติของจีโอพอลิเมอร์  
มอร์ตาร์ที่ใช้เศษยางรถยนต์เก่ามาเป็นมวลรวม  
ละเอียด พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ  
และมีการดูดซึมน้ำน้อยเมื่อเทียบกับมาตรฐานการ  
ดูดซึมน้ำของอิฐบล็อก และยังไปกว่านั้นการใช้เศษ  
ยางรถยนต์ยังสามารถช่วยลดปริมาณขยะเศษ  
ยางรถยนต์ได้อีกทาง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและ  
นวัตกรรมวัสดุ และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชน  
ครินทร์ ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในการ  
ทำวิจัยครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Transport Statistics Sub-Division, Number  
of Vehicle Registered as of 31 December 2020,  
Report of Transport Statistics for 2020, Planning  
Division, Department of Land Transport. [Online],  
Available: <https://web.dlt.go.th/statistics/>. (In  
Thai) [22 May 2020]

2. Transport Statistics Sub -Division, Num-  
ber of New Registered Vehicles 2020, Report  
of Transport Statistics for 2020, Planning Divi-  
sion, Department of Land Transport [Online],  
Available: <https://web.dlt.go.th/statistics/>. (In

Thai) [22 May 2020]

3. Atahan, A.O. and Yücel, A.Ö., 2012,  
“Crumb Rubber in Concrete: Static and  
Dynamic Evaluation,” *Construction and Building  
Materials*, 36, pp. 617-622.

4. Adamu, M., Mohammed, B.S., Shafiq, N.  
and Liew, M.S., 2020, “Durability Performance  
of High Volume Fly Ash Roller Compacted  
Concrete Pavement Containing Crumb Rubber  
and Nano Silica,” *International Journal of  
Pavement Engineering*, 21, pp. 1437-1444.

5. Park, Y., Abolmaali, A., Kim, Y.H. and  
Ghahremannejad, M., 2016, “Compressive  
Strength of Fly Ash-based Geopolymer Concrete  
with Crumb Rubber Partially Replacing Sand,”  
*Construction and Building Materials*, 118, pp.  
43-51.

6. Moghaddam, S.C., Madandoust, R., Jamshidi,  
M. and Nikbin, I. M., 2021, “Mechanical Properties  
of Fly Ash-based Geopolymer Concrete with  
Crumb Rubber and Steel Fiber under Ambient  
and Sulfuric Acid Conditions,” *Construction and  
Building Materials*, 281, p. 122571.

7. Long, W.J., Li, H.D., Wei, J.J., Xing, F.  
and Han, N.X., 2018, “Sustainable use of  
Recycled Crumb Rubbers in Eco-Friendly Alkali  
Activated Slag Mortar: Dynamic Mechanical  
Properties,” *Journal of Cleaner Production*,  
204, pp. 1004-1015.

8. Kazmierczak, C.D., Schneider, S.D., Aguilera,  
O., Albert, C.C. and Mancio, M., 2020, “Rendering  
Mortars with Crumb Rubber: Mechanical

Strength, Thermal and Fire Properties and Durability Behavior,” *Construction and Building Materials*, 253, p. 119002.

9. Wongpa, A., Sata, V., Nematollahi, B., Sanjayan, J. and Chindaprasirta, P., 2018, “Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Geopolymer Mortar Incorporating Crumb Rubber,” *Journal of Cleaner Production*, 195, pp. 1069-1080.

10. Zaetang, Y., Wongsa, A., Chindaprasirt, P. and Sata, V., 2019, “Utilization of Crumb Rubber as Aggregate in High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortars,” *International Journal of GEOMATE*, 17 (64), pp. 158-165.

11. American Society for Testing and Materials, 2019, “ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia.

12. American Society for Testing and Materials, 2008, “ASTM C109/C109M-07 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens),” *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.01, Philadelphia.

13. Wongsa, A., Sata, V. and Chindaprasirta, P., 2016, “The Flow Value, Compressive Strength, Density, and Thermal Conductivity of Crumb Rubber Geopolymer Mortar,” *The 21<sup>st</sup> National Convention on Civil Engineering*, 28-30 June 2016, Songkhla, Thailand, pp. 620-625.

14. Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T.

and Chindaprasirt, P., 2013, “Influence of Fineness of High Calcium Fly ash on Properties of Geopolymer Paste,” *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (4), pp. 399-408. (In Thai)

15. Boonserm, K., Baoulan, A., Lisnund, S., Supamathanon, N., Sombatsri, S., Paopongpailoon, K., Chotetanorm, C. and Chindaprasirt, P., 2018, “Synthesis of Geopolymer from Phimai Soil with Fly Ash,” *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (4), pp. 465-474. (In Thai)

16. Wardhono, A. 2019, “The Effect of Waterbinder Ratio on Strength Development of Class C Fly Ash Geopolymer Mortar Prepared by Dry Geopolymer Powder,” *MTEC Web of Conferences 258*, pp. 1-4.

17. Hawa, A., Prachasaree, W. and Tonnyayopas, D., 2017, “Effect of Water-to-Powder Ratios on the Compressive Strength and Microstructure of Metakaolin based Geopolymers,” *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 24 (6), pp. 499-506.

18. TIS. 58-2530, 1987, Standard for Hollow Non-load-bearing Concrete Masonry Units, Thai Industrial Standard, pp. 1-11. (In Thai)

19. Gunasekara, C.M., 2016, Influence of Properties of Fly Ash from Different Sources on the Mix Design and Performance of Geopolymer Concrete, Philosophy of Doctoral Engineering Thesis, Department of Civil and Infrastructure Engineering, School of Engineering, College of Science, Engineering and Health, RMIT University.

