

## การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินพินายผสมเถ้าลอย

กรกนก บุญเสริม<sup>1\*</sup> อารีพร เป้าอุฬาล<sup>1</sup> สิริรัตน์ ลิคนันท์ (อินทรวงำแหง)<sup>1</sup>

ณัฐธิดา คณิน ศุภเมธานนท์<sup>2</sup> สุदारัตน์ สมบัติศรี<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

กิตติชาติ เผ่าพงษ์ไพบูลย์<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ ต.นอกเมือง อ.เมือง จ.สุรินทร์ 32000

ชัยชาญ โชติถนอม<sup>4</sup>

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ท่าขอนยาง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

และ ปริญญา จินดาประเสริฐ<sup>5</sup>

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

\* Corresponding Author: kwinna@hotmail.com

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

<sup>3</sup> อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

<sup>4</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>5</sup> ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

### ข้อมูลบทความ

### บทคัดย่อ

#### ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 31 กรกฎาคม 2561

แก้ไข : 29 พฤศจิกายน 2561

ตอบรับ : 6 ธันวาคม 2561

#### คำสำคัญ :

จีโอพอลิเมอร์ / ดินพินาย /

เถ้าลอย /

สารละลายโซเดียมซิลิเกต /

โซเดียมไฮดรอกไซด์

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินพินายผสมเถ้าลอย โดยในขั้นต้นได้ปรับสภาพดินพินายและแทนที่ดินพินายด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราร้อยละ 0 50 และ 100 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนของสารละลายต่างต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ในแง่ของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ การบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ต่อมาบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 36 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นจึงศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินพินายผสมเถ้าลอย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ดินพินายด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับวัสดุปูนซีเมนต์ที่ใช้งานในปัจจุบัน

## Synthesis of Geopolymer from Phimai Soil with Fly Ash

Kornkanok Boonserm<sup>1\*</sup>, Aareporn Baoulan<sup>1</sup>, Sireerat Lisnund (Intarakamhang)<sup>1</sup>,  
Natkanin Supamathanon<sup>2</sup>, Sudarat Sombatsri<sup>2</sup>,

Rajamangala University of Technology, Nai Muang, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Kittichat Paopongpaiboon<sup>2</sup>

Surindra Rajabhat University, Nok Mueang, Muang, Surin 32000

Chaicharn Chotetanorm<sup>3</sup>

Maharakham University, Tha Khon Yang, Kantharawichai, Maharakham 44150

and Prinya Chindaprasit<sup>4</sup>

Khon Kaen University, Nai Mueang, Muang, Khon Kaen 40002

\* Corresponding Author: [kwinna@hotmail.com](mailto:kwinna@hotmail.com)

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts.

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Civil Engineering Technology and Architecture, Faculty of Industrial Technology.

<sup>4</sup> Assistant Professor, Concrete and Computer Research Unit, Faculty of Engineering.

<sup>5</sup> Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering,

### Article Info

### Abstract

#### Article History:

Received: July 31, 2018

Revised: November 29, 2018

Accepted: December 6, 2018

#### Keywords:

Geopolymer / Phimai Soil /

Fly Ash /

Sodium Silicate Solution /

Sodium Hydroxide Solution

This research studied the synthesis of geopolymer material from Phimai soil with fly ash. Phimaisoil was first pretreated prior to its use. The replacements of Phimai soil by high calcium fly ash at the levels of 0, 50 and 100% by weight of binder, alkali liquid / binder ratio of 0.75,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  / NaOH ratio of 1.5, NaOH at 15 molar were investigated. Curing was conducted at three stages: at 60 °C for 12 hours, at 70 °C for 36 hours and at 25 °C for 5 days. Physical, chemical and mechanical properties of geopolymer were then also evaluated. The results showed that the replacement of Phimai soil with 50% fly ash by weight resulted in the geopolymer material of similar compressive strength to the currently used material from Portland cement.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง โดยทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานในงานมอร์ตาร์และคอนกรีต อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน (greenhouse effect) ที่ผู้คนทั่วโลกกำลังเผชิญอยู่ ณ ขณะนี้ เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงได้มีการนำวัสดุพอลิโพรพิลีน (polypropylene) ใยแก้ว แก้วใย และซิลิกาฟูม เป็นต้น มาใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ [1] นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการใช้วัสดุที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลจากงานก่อสร้างหรือตึกอาคารเก่าที่ถูกทุบมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต [2, 3] จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมามีการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนมาผสมร่วมกับเบสความเข้มข้นสูงจะทำให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติทดแทนปูนซีเมนต์ได้มีชื่อเรียกว่า “วัสดุโพลีเมอร์” ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและทางกลเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ทางการค้า [4, 5] แต่ใช้พลังงานในการผลิตที่ต่ำ และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึงร้อยละ 47 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ [6-8] จากผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการผลิตโพลีเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ดินขาวเผาซึ่งเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนที่มีคุณภาพสูงมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น [9-11] เนื่องจากดินขาวมีแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลักและมีความบริสุทธิ์สูง ทำให้ง่ายต่อการปรับสภาพด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของซิลิกาและอลูมินาในแคลไซต์ให้กลายเป็นโครงสร้างเมตาแคลไซต์ที่มีความเป็นอสัณฐาน ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปผลิตเป็นวัสดุโพลีเมอร์ที่มีความแข็งแรง แต่ทั้งนี้ดินขาวเป็นวัตถุดิบที่หายากและต้องนำไปเผาปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้กลายเป็นอสัณฐานก่อนนำมาใช้งานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเป็นอันมาก งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำดินที่อยู่ในท้องถิ่นและหาง่าย เช่น ดินพินายมาใช้ในการผลิตโพลีเมอร์ โดยทำการปรับปรุงคุณภาพของดินพินายก่อนนำไปใช้งาน โดยใช้วิธีทางเคมีทดแทนวิธีการปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำการพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุด้วยการเติมแก้วลอยเคลือบสูงเข้าไปในส่วนผสม [12, 13] ซึ่งองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้สามารถพัฒนาวัสดุโพลีเมอร์ที่มีคุณภาพดีเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้

## 2. วัสดุและวิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 ดินพินาย จากอำเภอพินาย จังหวัดนครราชสีมา

2.1.2 แก้วลอยเคลือบสูง จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

### 2.2 ขั้นตอนการปรับสภาพดินพินาย

2.2.1 ขั้นตอนการกำจัดคาร์บอนเนต

1) นำดินพินายที่ผ่านการบดจนมีขนาด 200 ไมครอน มาละลายในสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตตในอัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 3 ปั่นกวนดินและสารละลายให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที (ทำซ้ำ 2 ครั้ง)

2) เทสารละลายทิ้งแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ปั่นกวนตะกอนในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 5 นาที (ทำซ้ำ 2 ครั้ง)

3) ทำการกรองแยกตะกอนดินออกจากน้ำกลั่นแล้วนำดินที่ได้ไปกำจัดสารอินทรีย์ต่อไป

2.2.2 ขั้นตอนการกำจัดสารอินทรีย์

1) นำดินที่ผ่านการกำจัดคาร์บอนเนตแล้วมาเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 1 ปั่นกวนดินและสารละลายให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที (ทำซ้ำ 2 ครั้ง)

2) เทสารละลายทิ้งแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ปั่นกวนตะกอนในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 5 นาที (ทำซ้ำ 2 ครั้ง)

3) ทำการกรองแยกตะกอนดินออกจากน้ำกลั่นแล้วนำดินที่ได้ไปอบให้แห้ง

4) บดดินให้มีขนาด 45 ไมครอน เก็บดินที่ได้ไว้สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการทำโพลีเมอร์ต่อไป

### 2.3 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

ใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อดินปรับสภาพเท่ากับ 0.75 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์แทนที่ดินพินายด้วยแก้วลอยเคลือบสูงในอัตราร้อยละ 0 50 และ 100 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

### 2.4 วิธีการผสมโพลีเมอร์

ขั้นตอนการผสมโพลีเมอร์ทำได้โดยนำดินพินายและแก้วลอยเคลือบสูงใส่ในเครื่องผสม เติมน้ำและเติมสารละลายโซเดียม-

ไฮดรอกไซด์ลงไปแล้วผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตแล้วผสมต่อให้ส่วนผสมเข้ากันอีก 5 นาที และหล่อเข้าแบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] จากนั้นสั้นด้วยโต๊ะเขย่าอีก 30 วินาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ นำแบบหล่อเข้าตู้อบเพื่อบ่มร้อนที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของวัสดุตั้งต้นที่มีดินเป็นองค์ประกอบหลัก จากนั้นตัวอย่างจะเกิดการแข็งตัวและสามารถเพิ่มอุณหภูมิการบ่มเป็น 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 36 ชั่วโมง เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อครบระยะเวลาการบ่มร้อนที่ 48 ชั่วโมง แล้วปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มคงที่ จากนั้นจะนำตัวอย่างออกจากเตาอบแล้วนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน

## 2.5 การศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันตามมาตรฐาน ASTM C109 [14] วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่

ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD) และวิเคราะห์โครงสร้างทางโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)

## 4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

### 4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินพินายและเถ้าลอยแคลเซียมสูง

องค์ประกอบทางเคมีของดินพินายหลังปรับสภาพด้วยสารเคมีและเถ้าลอยแคลเซียมสูงแสดงดังตารางที่ 1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าดินพินายหลังปรับสภาพมีองค์ประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 54.65 และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 31.95 ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ส่วนเถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จัดเป็นวัสดุพอโซลานที่มีคุณภาพสูง [15] มี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 35.20 มี  $\text{CaO}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบรองเท่ากับ ร้อยละ 27.70 และ 16.50

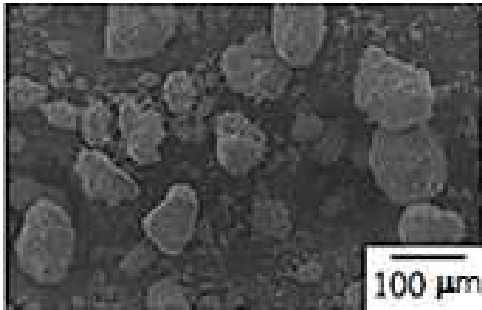
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ดินพินายหลังปรับสภาพ	เถ้าลอย
Silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ )	54.65	35.20
Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	31.95	16.50
Iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	7.90	13.60
Magnesium oxide ( $\text{MgO}$ )	1.05	3.20
Sodium oxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	1.81	-
Calcium oxide ( $\text{CaO}$ )	0.07	27.70
Potassium oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0.79	1.90
Titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ )	0.63	0.30
Sulfur trioxide ( $\text{SO}_3$ )	-	1.60

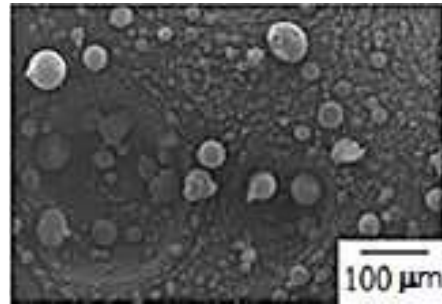
4.1.2 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของดินพินายและเถ้าลอยแคลเซียมสูง

รูปที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของดินพินายหลังปรับสภาพและเถ้าลอยแคลเซียมสูง

พบว่าดินพินายหลังปรับสภาพด้วยสารเคมีมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม ผิวมีลักษณะเรียบส่วนเถ้าลอยจะมีรูปร่างที่แน่นอนมีลักษณะกลมทำให้ดินพินายมีความต้องการสารละลายในการทำปฏิกิริยามากกว่าเถ้าลอย



(ก)



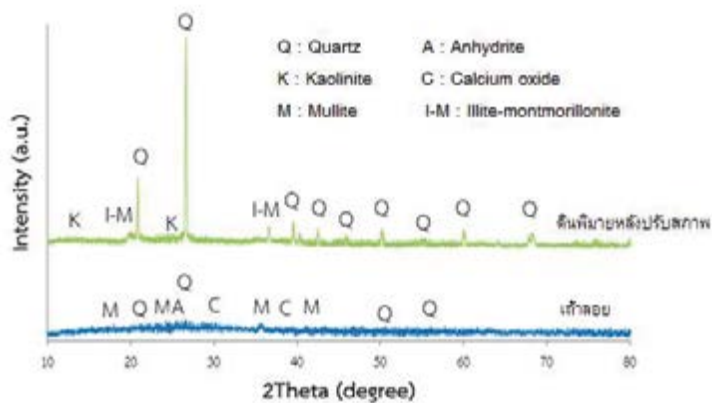
(ข)

รูปที่ 1 โครงสร้างทางจุลภาคของ (ก) ดินพินายหลังปรับสภาพ และ (ข) เถ้าลอย

4.1.3 องค์ประกอบทางแร่ของดินพินายและเถ้าลอยแคลเซียมสูง

รูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินพินายหลังปรับสภาพ พบว่ามีแร่ Kaolinite ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), Illite-montmorillonite ( $KAl_3(Si, Al)_8O_{10}(OH)_4 \cdot 4H_2O$ ) และ Quartz ( $SiO_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ดินพินายหลังปรับสภาพ จะมีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เป็นวัสดุพอลิไซลันที่มีคุณภาพดีขึ้น

สำหรับองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอย พบว่ามีผลึกของแร่ Anhydrite ( $CaSO_4$ ), Calcium oxide ( $CaO$ ) และ Quartz ( $SiO_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีความเป็นอสัณฐานในปริมาณสูง ซึ่งพบในช่วง 2 theta เท่ากับ 10-40 องศา แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุพอลิไซลันที่มีคุณภาพดีกว่าดินพินายหลังปรับสภาพ

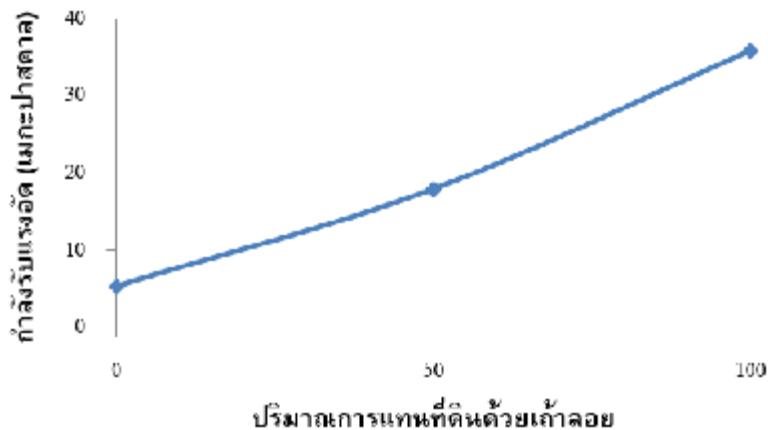


รูปที่ 2 องค์ประกอบทางแร่ของดินพินายหลังปรับสภาพและเถ้าลอย

#### 4.2 กำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินพินายผสมเถ้าลอย

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ พบว่าสัดส่วนผสมระหว่างดินพินายปรับสภาพต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0:100 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมาคือ 50:50 และ 100:0 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 35.76 17.83 และ 5.27 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุพิษโซลันที่มีความเป็นออสซิลสูง ซึ่งการเพิ่มเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณซิลิกาและ

อลูมินาที่อยู่ในรูปอสซิลฐาน [15, 16] เมื่อเถ้าลอยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้มากกว่าดินพินายหลังปรับสภาพที่มีความเป็นออสซิลฐานต่ำ อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยในสัดส่วนผสมระหว่างดินพินายปรับสภาพต่อเถ้าลอยเท่ากับ 50:50 จะทำให้กำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าที่เหมาะสมซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเพสต์ซีเมนต์ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 21 เมกะปาสคาล [17] ที่อายุ 7 วัน โดยสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการนำไปผลิตเป็นอิฐก้อนผนังเพื่อใช้ในงานก่อสร้างได้

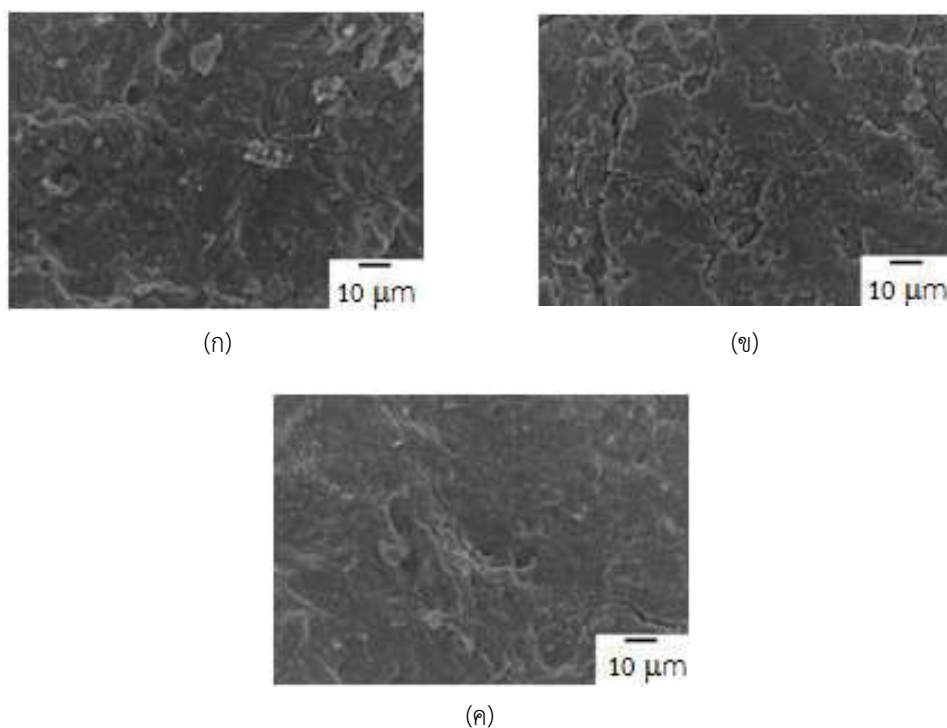


รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากการแทนที่ดินพินายหลังปรับสภาพด้วยเถ้าลอยในปริมาณต่างกันที่อายุ 7 วัน

#### 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินพินายผสมเถ้าลอย

รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากสัดส่วนผสมระหว่างดินพินายปรับสภาพต่อเถ้าลอยในปริมาณต่างกัน พบว่าการแทนที่ดินพินายหลัง

ปรับสภาพด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้วัสดุมีโครงสร้างที่แน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งผลการวิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

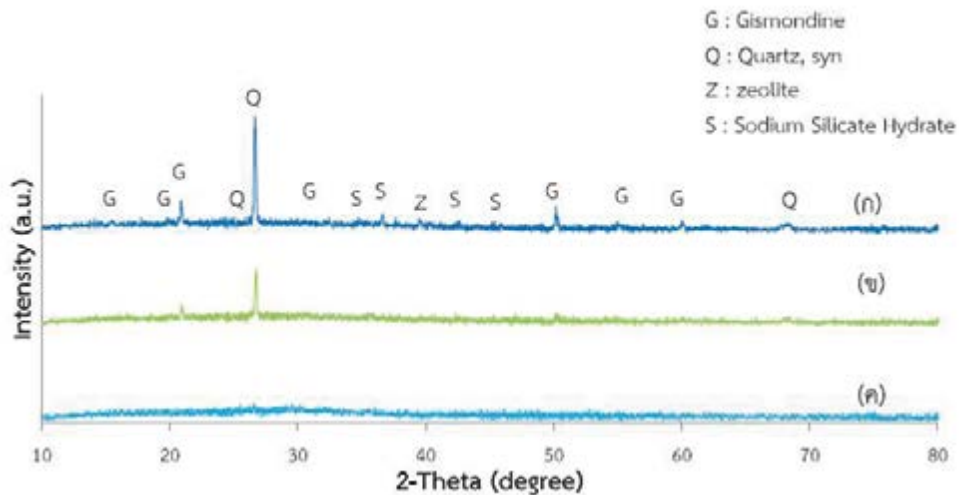


รูปที่ 4 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์โดยใช้อัตราส่วนดินพินายหลังปรับสภาพ ต่อเถ้าลอยเท่ากับ (ก) 100:0 (ข) 50:50 และ (ค) 0:100

#### 4.4 องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จากดินพินายผสมเถ้าลอย

รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของ จีโอพอลิเมอร์จากสัดส่วนผสมระหว่างดินพินายปรับสภาพต่อ เถ้าลอยในปริมาณต่างกัน พบว่าจะมีสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้น คล้ายคลึงกัน ได้แก่ แร่ Gismondine ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), Zeolite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}$ ), Sodium Silicate Hydrate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งสารประกอบที่ให้ความแข็งแรง คือ Gismondine, Zeolite และ Sodium Silicate Hydrate โดยร้อยละดินพินายหลังปรับสภาพต่อเถ้าลอย เท่ากับ 100:0 จะพบปริมาณความเข้มของพีคของสารประกอบใหม่ที่เป็นผลึก

มากที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน 50:50 สำหรับสัดส่วนผสม ระหว่างดินพินายปรับสภาพต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0:100 จะไม่ พบการปรากฏของสารประกอบใหม่ดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากการ แทนที่ดินพินายหลังปรับสภาพด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะทำให้โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น [16] จึงทำให้การปรากฏพีคของสารประกอบใหม่ที่เป็นผลึก พบในปริมาณน้อยลง แม้ว่าสารประกอบใหม่ที่พบจะสามารถ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างได้ แต่โครงสร้างที่เป็น ลักษณะกึ่งผลึกกึ่งอสัณฐานเช่นนี้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐานล้วน [14] หรือโครงสร้าง ที่เป็นผลึกล้วน

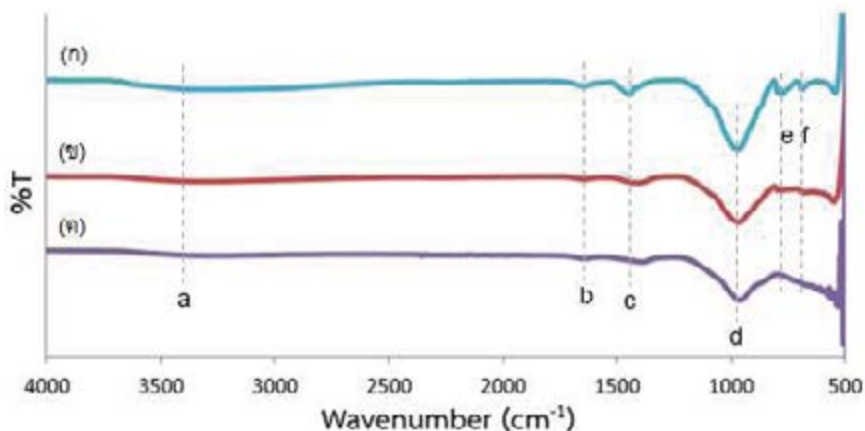


รูปที่ 5 องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์โดยใช้อัตราส่วนดินพินายหลังปรับสภาพต่อแก้วลอยเท่ากับ (ก) 100:0 (ข) 50:50 และ (ค) 0:100

#### 4.5 โครงสร้างทางโมเลกุลของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์จากดินพินายผสมแก้วลอย

รูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางโมเลกุลของอีพอกซีโพลีเมอร์จากสัดส่วนผสมระหว่างดินพินายปรับสภาพต่อแก้วลอยในปริมาณต่างกันพบว่าการปรากฏของหมู่ฟังก์ชัน

Si-O-Al st. (Zeolites) ดังแสดงในตารางที่ 2 ในสัดส่วนผสมระหว่างดินพินายปรับสภาพต่อแก้วลอยเท่ากับ 100:0 จะมีความเข้มของพีคสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมอื่นๆ แสดงถึงการเกิดเป็นสารประกอบ Zeolites ซึ่งเป็นสารประกอบใหม่ที่สำคัญของกระบวนการเกิดอีพอกซีโพลีเมอร์ [14]



รูปที่ 6 โครงสร้างทางโมเลกุลของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์โดยใช้อัตราส่วนดินพินายหลังปรับสภาพต่อแก้วลอยเท่ากับ (ก) 100:0 (ข) 50:50 และ (ค) 0:100



ตารางที่ 2 โครงสร้างทางโมเลกุลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากการแทนที่ดินพิมายหลังปรับสภาพด้วยเถ้า

ดินพิมายหลัง ปรับสภาพ: เถ้าลอย	ค่าความถี่ของสเปกตรัม (cm <sup>1</sup> )					
	a	b	c	d	e	f
100:0	3239	1645	1446	972	777	692
50:50	3310	1644	1415	969	778	683
0:100	3343	1646	1390	967	773	601
สัญลักษณ์	O-H	O-H	Si-O/Al-O st.	Si-O/Al-O st.	Si-O-Si st.	Si-O-Al st.
	st.	bd.	Amorphous	Quartz	Quartz	Zeolites

## 5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาพบว่า การปรับสภาพดินพิมายและการแทนที่ดินด้วยเถ้าลอยในปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการแทนที่ดินพิมายด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมประมาณ 18 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเพสต์ซีเมนต์ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 21 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7 วัน [17] โดยวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในงานประเภทคอนกรีตบล็อกหรือวัสดุมวลเบา เป็นต้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนจากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Nitichote, K. and Yodsudjai, W., 2017, "Sustainable Development of Concrete by Using Recycled Aggregates in the Mix," *Thailand Concrete Association Journal*, 5 (2), pp. 29-30. (In Thai)
2. Toolkasikorn, P., Tangchirapat, W. and Jaturapitakul, C., 2014, "Strength and Chloride Resistance of

Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Rice Husk Ash," *Thailand Concrete Association Journal*, 2 (1), pp. 8-16. (In Thai)

3. Rattanachu, P., Tangchirapat, W. and Jaturapitakul, C., 2016, "The Mechanical Properties of High Strength Concrete by Using Recycled Aggregate Concrete Mixed with Crushed Bagasse Ash in the Proportion," *Thailand Concrete Association Journal*, 4 (2), pp. 36-48. (In Thai)

4. Davidovits, J., 1991, "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials," *Journal of Thermal Analysis*, 37, pp. 1633-1656.

5. Davidovits, J., 1999, "Chemistry of Geopolymer Systems Terminology," *Proceedings of Geopolymer, International Conference, France*, pp. 9-40.

6. Boonserm, K., Sata, V., Pimraksa, K. and Chindaprasit, P., 2012, "Improved Geopolymerization of Bottom Ash by Incorporating Fly Ash and Using Waste Gypsum as Additive," *Cement and Concrete Composites*, 34 (7), pp. 819-824.

7. Kaur, K., Singh, J. and Kaur, M., 2018, "Compressive Strength of Rice Husk Ash Based Geopolymer: The Effect of Alkaline Activator," *Construction and Building Materials*, 169, pp. 188-192.

8. Duan, P., Yan, C. and Zhou, W., 2017, "Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Blended with Silica Fume under Thermal Cycle," *Cement and Concrete Composites*, 78, pp. 108-119.
9. Balczár, I., Korim, T., Kovács, A. and MakóE., 2016, "Mechanochemical and Thermal Activation of Kaolin for Manufacturing Geopolymer Mortars Comparative Study," *Ceramics International*, 42 (14), pp. 15367-15375.
10. Wang, M.R., Jia, D.C., He, P.G. and Zhou, Y., 2010, "Influence of Calcination Temperature of Kaolin on the Structure and Properties of Final Geopolymer," *Materials Letters*, 64 (22), pp. 2551-2554.
11. Pelisser, F., Guerrino, E.L., Menger, M., Michel, M.D. and Labrincha, J.A., 2013, "Micromechanical Characterization of MetaKaolin-Based Geopolymers," *Construction and Building Materials*, 49, pp.547-553.
12. Poltue, T., Suddepong, A. and Horpibulsuk, S., 2017, "Strength of Recycled Concrete Aggregate Binding with Fly Ash-Rice Husk Ash Based Geopolymer for Pavement Sub Bases Application," *KMUTT Research and Development Journal*, 40, pp. 567-581. (In Thai)
13. Phatitriwatt, N. and Chalee, W. 2017, "Effect of Curing Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar," *KMUTT Research and Development Journal*, 40, pp. 355-364. (In Thai)
14. ASTM C109, 2001, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)," *Annual Book of ASTM Standard*, 4 (1), pp. 83-88.
15. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Chinkulkijniwat, A. and Cholaphatsorn, A., 2013, "Strength Development in Silty Clay Stabilized with Calcium Carbide Residue and Fly Ash," *Soils and Foundations*, 53 (4), pp. 477-486.
16. Hwang, C. and Huynh, T., 2015, "Effect of Alkali-Activator and Rice Husk Ash Content on Strength Development of Fly Ash and Residual Rice Husk Ash-Based Geopolymers," *Construction and Building Materials*, 101 (1), pp. 1-9.
17. Chatveera, B., 2001, "Mechanical Properties of Cement Paste Containing Rice Straw Ash," *KMUTT Research and Development Journal*, 24, pp. 85-99. (In Thai)