



การปรับปรุงดินลมหอบด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและตะกั่วเตาถลุงเหล็ก
UTILIZATION OF GEOPOLYMER ON IMPROVEMENT OF LOESS SOIL USING PALM OIL FUEL
ASH AND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG

วุฒิชัย ผุดผ่อง¹ และดลฤดี หอมดี^{2*}

¹นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Corresponding author, E-Mail: dolhor@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานที่นำดินลมหอบมาปรับปรุงด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในการทำถนนชั้นพื้นทาง โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและตะกั่วเตาถลุงเหล็ก เทียบกับดินซีเมนต์ โดยพิจารณากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และทดสอบความคงทนเปียกสลับแห้ง อัตราส่วนผสมซีเมนต์ 5 7 9 และ 11 % โดยมวลดินแห้ง ระยะการบ่ม 2 7 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง วัสดุจีโอพอลิเมอร์ใช้อัตราส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง และอัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันผสมกับตะกั่วเตาถลุงเหล็ก 5 กับ 3 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมลาร์ ที่มีอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:3 ระยะเวลาบ่มร้อน 1 วัน ที่อุณหภูมิ 70 90 และ 110 องศาเซลเซียส และบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 2 7 และ 28 วัน การศึกษาพบว่าในอัตราส่วนที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับตะกั่วเตาถลุงเหล็กเทียบกับอัตราส่วนที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียว ระยะเวลาบ่ม 28 วัน พบว่ามีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าร้อยละ 2.8 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินซีเมนต์ในอัตราส่วนผสม 5 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละ 11.7 เมื่อทำการทดสอบความคงทนเปียกสลับแห้งพบว่าในอัตราส่วนที่ผสมตะกั่วเตาถลุงเหล็กพบว่ามีค่าการสูญเสีย น้ำหนักมากกว่าเล็กน้อยในอัตราส่วนที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 0.3 และมีการสูญเสียน้อยกว่าดินซีเมนต์ ในอัตราส่วนผสม 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าร้อยละ 3.1

คำสำคัญ: การปรับปรุงเสถียรภาพของดิน; ดินซีเมนต์; จีโอพอลิเมอร์; ชั้นพื้นทาง; เถ้าปาล์มน้ำมัน; ตะกั่วเตาถลุงเหล็ก; อุณหภูมิ

ABSTRACT

This research was aimed to improve the loess soil for base course using palm oil fuel ash and granulated blast furnace slag – based geopolymer and compared to the conventional soil cement. The unconfined compression test and wet-dry durability test were performed in laboratory. The ratio cement is 5, 7, 9, and 11 percent by mass with the room temperature curing for 2, 7, and 28 days. Soil geopolymer used palm oil fuel ash of 5 and 10 percent by mass and 5 percent of palm oil fuel ash mixed with 3 percent granulated blast furnace slag by mass. The concentration of sodium hydroxide solution of 10 molar with the ratio of sodium silicate and sodium hydroxide of 1:3 was used as alkali base. The determined curing phase was 2, 7, and 28 days, controlling

Wuttichai Phudphong¹ and Dolrerdee Hormdee^{2*}

¹Graduate student, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

²Assist.Prof., Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

temperature at 70, 90, and 110 degrees of Celsius at the first day. The results shown that the soil geopolimer using palm oil fuel ash mix granulated blast furnace slag 5 with 3 percent by mass provided higher strength than using palm oil fuel ash 5 percent by mass about 2.8 percent at 70 degrees of Celsius at curing 28 days, and by exhibited higher strength than soil cement used 5 percent about 11.7 percent. In the term of percent weight loss on durability test, geopolimer using palm oil fuel ash with granulated blast furnace slag provided just littlebit more than using palm oil fuel ash as 0.3 percent and less than soil cement used 5 percent is 3.1 percent.

KEYWORD: soil stabilization; soil cement; geopolimer; base layer; palm oil fuel ash; granulated blast furnace slag; temperature

1. บทนำ

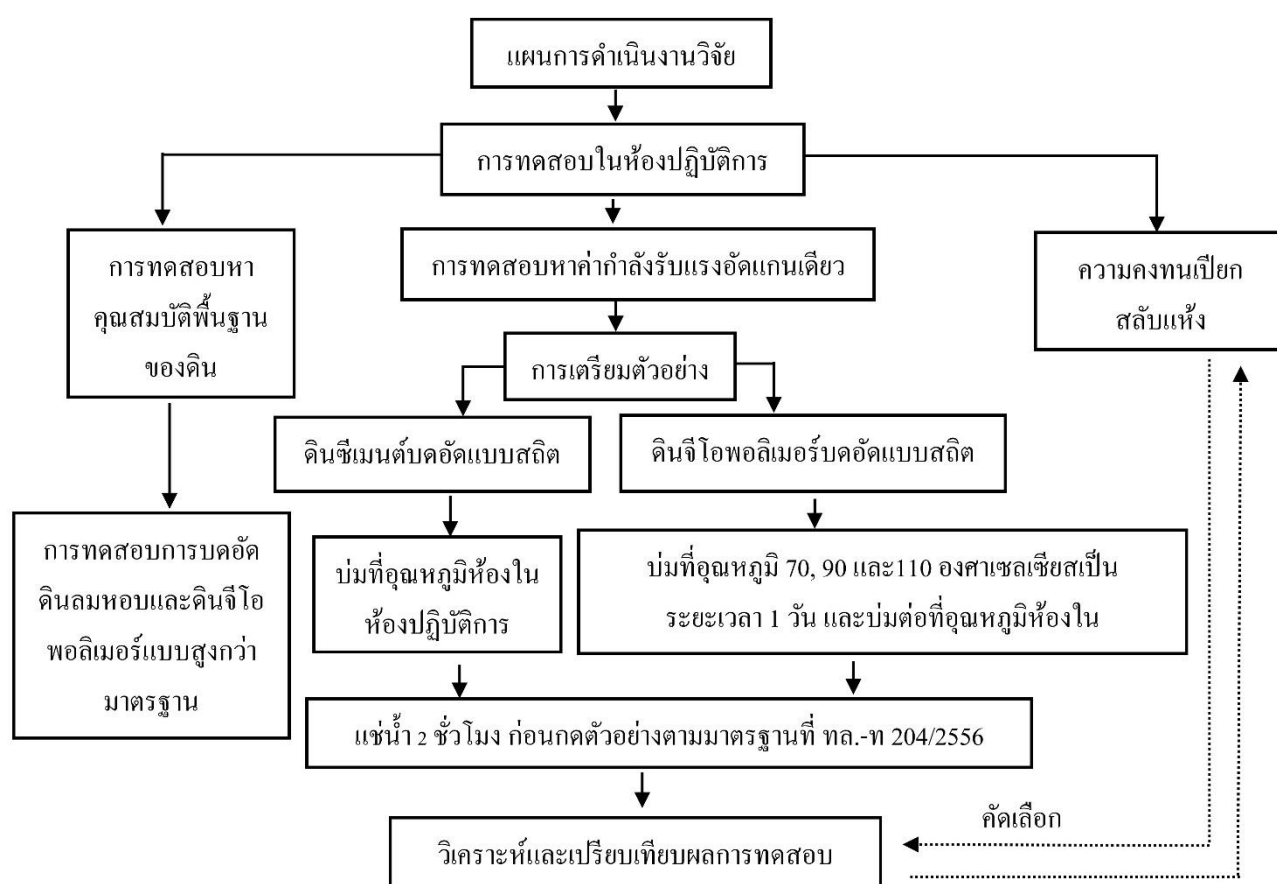
ในปัจจุบันวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างถนนมีวัสดุคัดเลือกหลากหลายในการใช้งาน วัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างช่วงแรกเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายมีใช้ในท้องถิ่น เช่น ดินลูกรัง ช่วยให้ประหยัดงบประมาณได้มาก และสามารถรับกำลังอัดได้ดี แต่ในหน้าฝนพบว่าดินลูกรังมีปัญหาถูกกัดเซาะจากน้ำฝนเกิดเป็นหลุมบ่อ จึงนิยมนำมาปรับปรุงโดยผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อเพิ่มความแข็งของดินลูกรัง กรมทางหลวงจึงนิยมนำซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาปรับปรุงดินเป็นชั้นพื้นทาง โดยมาตรฐานที่ ทล.-ท 204/2556 [1] เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้สูงขึ้น จากงานวิจัยของ ชีระชาติและคณะ [2] ได้ศึกษาดินซีเมนต์ พบปัญหาว่ากระบวนการผลิตซีเมนต์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากโรงงานอุตสาหกรรม ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ทำให้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมาเป็นจำนวนมากและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุอิโพลีเมอร์ขึ้นเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานจากการศึกษาของ พัทธกรณ์และคณะ [3] ได้ศึกษาอิโพลีเมอร์พบว่า เป็นวัสดุคัดเลือกนำมาใช้แทนซีเมนต์ เนื่องจากปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้อยมาก โดยวัตถุดิบองค์ประกอบทางเคมี ของธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นหลัก พบได้จากของเสียที่ถูกกำจัดทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยการศึกษาของ อุบลลักษณ์และคณะ [4] ได้ศึกษาสมบัติของอิโพลีเมอร์สามารถรับกำลังอัดได้สูง ทนความร้อน ทนการกัดกร่อน ทนต่อการซึมผ่านน้ำได้ ในสมบัติเหล่านี้เกิดจากกระบวนการทางเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต ทำหน้าที่ชะธาตุที่ต้องการในวัสดุ และเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำปฏิกิริยาอิโพลีเมอร์ไรเซชัน เกิดโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานที่มีความแข็งแรง โดยงานวิจัยของ Moslih และคณะ [5] ได้ศึกษาอิทธิพลการบ่มต่ออุณหภูมิของโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เถาปลาล์มน้ำมัน บ่มที่อุณหภูมิ 25 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของเถาปลาล์มน้ำมัน จากงานวิจัยของ Ziyad และคณะ [6] ได้ศึกษาอิโพลีเมอร์มอร์ต้าโดยผสมตะกั่วแดงสูงเหล็ก เถาปลาล์มน้ำมัน และเถาลอย ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ความเข้มข้น 8 โมลาร์ โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมซิลิเกตผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสารละลายทำให้มีกำลังอัดเพิ่มสูงเรียงตามลำดับ คือ โซเดียมซิลิเกต โซเดียมซิลิเกตผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากงานวิจัยของ Ameri และคณะ [7] ได้ศึกษาอิโพลีเมอร์โดยมีตะกั่วแดงสูงเหล็กเป็นส่วนประกอบพบว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างโดยเพิ่ม Calcium Silicate hydrated (CSH) gel และ Calcium Aluminosilicate (CASH) gel ที่มีความแข็งแรง

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดของดินลมหอบที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเจ้าป่าลมน้ำมันและตะกอนเตาถลุงเหล็ก เทียบกับดินลมหอบที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์
- 2.2 เปรียบเทียบผลของค่าความคงทนของการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wet-dry test) ระหว่างดินจีโอพอลิเมอร์กับดินซีเมนต์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ได้แบ่งแผนการดำเนินงานวิจัยเป็น 4 หัวข้อ และสรุปได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ดินลมหอบ (Loess Soil) ทดสอบสมบัติพื้นฐาน โดยการจำแนกตามมาตรฐานวิศวกรรมของดินลมหอบการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การกระจายของขนาดเม็ดดิน วัดความชื้นเหลวของดิน และการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.2 ดินซีเมนต์ (Soil Cement) ใช้ปริมาณซีเมนต์ คือ 5 7 9 และ 11 เปอร์เซ็นต์ของมวลดินแห้ง (SC5 SC7 SC9 และ SC11) และใช้น้ำผสมที่ความชื้นเหมาะสมโดยการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน เนื่องจากมีค่าความชื้นที่เหมาะสมใกล้เคียงกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียบบ่มด้วยถุงพลาสติกเป็นระยะเวลา 2 7 และ 28 วัน ทำการอัดตัวอย่างดินซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 2

3.3 ดินจิโอฟอลิเมอร์ (Soil Geopolymer) ทดสอบสมบัติองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน และตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยการทดสอบโดยวิธี XRF (X-ray fluorescence) การทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว อัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้ คือ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง (PA5 และ PA10) และเถ้าปาล์มน้ำมันผสมกับตะกรันเตาถลุงเหล็ก 5 กับ 3 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง (PA5-3) ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 ของค่าปริมาณสารละลายที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content, OLC) จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานมีการควบคุมอุณหภูมิบ่มร้อนระยะเวลา 1 วัน ที่ 70 90 และ 110 องศาเซลเซียส และบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง โดยที่ 70 องศาเซลเซียส มีระยะการบ่มทั้งหมด คือ 2 7 และ 28 วัน และที่อุณหภูมิ 90 และ 110 องศาเซลเซียส มีระยะการบ่มทั้งหมด คือ 1 2 3 7 และ 28 วัน ทำการอัดตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3

3.3.1 วิธีการผสมดินจิโอฟอลิเมอร์ (Mix Soil Geopolymer) เตรียมตัวอย่างดินลมหอบร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ตามมาตรฐาน PCA (The Portland Cement Association) และนำไปอบให้แห้ง เถ้าปาล์มน้ำมันร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อคัดแยก วัสดุที่มีขนาดใหญ่ ออกให้เหมาะกับการใช้งาน นำไปอบให้แห้ง แสดงดังรูปที่ 4 และตะกรันเตาถลุงเหล็กได้ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อเพิ่มพื้นที่จำเพาะ (Specific Surface) ช่วยในการทำปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 5 จากนั้นผสมเถ้ากับดินให้เข้ากันก่อน แล้วจึงเตรียมสารละลาย เนื่องจากสารละลายมีการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจึงได้กำหนดระยะเวลาในการผสม โดยผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตเข้าด้วยกันแล้วใช้แท่งคน ใช้เวลา 1 นาที แสดงดังรูปที่ 6 หลังจากนั้น ผสมสารละลายเข้ากับดิน และเถ้าที่เตรียมไว้แล้วใช้เวลา 5 นาที คลุกเคล้าให้เข้ากัน นำมาบรรจุใส่ถุงพลาสติก จำนวน 4 ถุง เท่าๆ กันสำหรับ 4 ชั้นในการบดอัด 1 ตัวอย่าง ตามมาตรฐานดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท 204/2556 [1] แสดงดังรูปที่ 7 เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วจึงนำไปอัดเป็นตัวอย่างขนาดแบบเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 8

3.4 การทดสอบความคงทนเปียกสลับแห้ง (Wet-dry test) ตามมาตรฐาน ASTM D559 [8] โดยการแช่น้ำ 5 ชั่วโมง สลับกับการอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส 42 ชั่วโมง แล้วชุดทำการชั่งมวล เป็นจำนวน 12 รอบ สังเกตมวลที่สูญเสียไป แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 2 ดินซีเมนต์



รูปที่ 3 ดินจิโอฟอลิเมอร์



รูปที่ 4 เถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก



รูปที่ 6 สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 7 ถุงเตรียมตัวอย่าง



รูปที่ 8 แบบอัดตัวอย่าง



รูปที่ 9 การทดสอบความคงทนดินจิโอฟอลิเมอร์

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของดินลมหอบ (Loess soil)

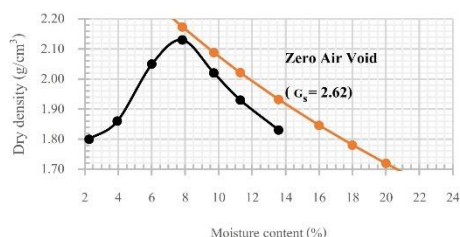
จากงานวิจัยตัวอย่างดินเป็นดินลมหอบที่พบได้ในจังหวัดขอนแก่น โดยเก็บตัวอย่างดินที่มีความลึก 1.5 เมตร จากระดับผิวดิน บริเวณมหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้นำมาทดสอบสมบัติพื้นฐาน การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดิน และค่าสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลมหอบ ได้แสดงผลไว้ดังตารางที่ 1 และ รูปที่ 10

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของดินในห้องปฏิบัติการ

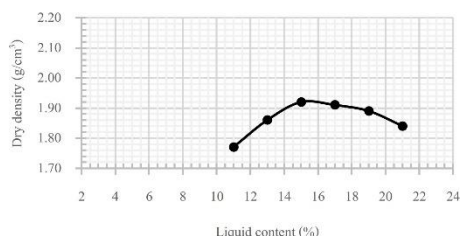
%Passing #4 (%)	%Passing #200 (%)	LL (%)	PL (%)	G_s	OMC (%)	γ_d (g/cm ³)	USCS	AASHTO
100	43.5	17.6	NP	2.62	7.80	2.13	SM	A-4

4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test)

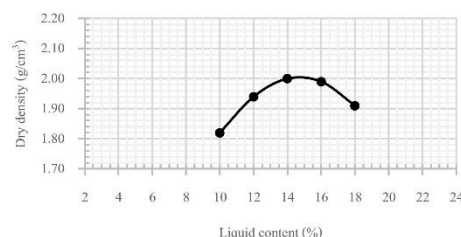
การทดสอบบดอัดดินลมหอบ และดินจีโอพอลิเมอร์ PA5 PA10 และ PA5-3 โดยใช้ขนาดแบบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร สูง 11.68 เซนติเมตร มีค่าปริมาณสารละลายที่เหมาะสมที่ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Liquid Content) คือ 14.8 15.4 และ 18.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 11 12 และ 13 ตามลำดับ โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มน้ำมากขึ้นความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_{max}) มีแนวโน้มลดลง และให้ค่าสารละลายที่เหมาะสมมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มตะกรัน เตาหลุงเหล็กค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_{max}) และสารละลายที่เหมาะสม (OLC) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



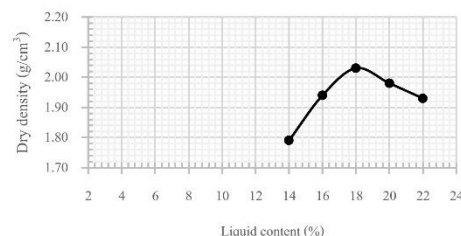
รูปที่ 10 ผลการทดสอบการบดอัดดินลมหอบ



รูปที่ 12 ผลการทดสอบการบดอัดดินจีโอพอลิเมอร์ PA10



รูปที่ 11 ผลการทดสอบการบดอัดดินจีโอพอลิเมอร์ PA5



รูปที่ 13 ผลการทดสอบการบดอัดดินจีโอพอลิเมอร์ PA5-3

4.3 ผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเถ้าปาล์มน้ำมันและตะกั่วเตาหลอมเหล็กโดยการตรวจสอบสมบัติทางเคมี

การทดสอบด้วยเครื่อง XRF (X-ray Fluorescence) เพื่อหาองค์ประกอบของธาตุที่ต้องการ โดยแบ่งตามความเข้มข้นเชิงมวล (Mass concentration) สำหรับวัสดุจีโอพอลิเมอร์องค์ประกอบที่จำเป็นคือสารประกอบ ซิลิกอน ไดออกไซด์ และอลูมินาใช้ในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างอณูฐานที่แข็งแรง

4.3.1 ดินลมหอบ (Loess Soil) พบปริมาณ ซิลิกอน ไดออกไซด์ที่สูง แต่เนื่องจากเป็นดินชนิด Silty Sand (SM) มีโครงสร้างที่เป็นผลึกจึงส่งผลต่อโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ที่เป็นอณูฐานน้อย

4.3.2 เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่ามีความสารประกอบของซิลิกอน ไดออกไซด์ และอลูมินาที่น้อย และมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ทดสอบเป็นเถ้าปาล์มน้ำมันที่มาจากหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งมีการใช้งานในระยะเวลาที่นานจึงมีปริมาณธาตุเหล็กติดมามาก แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C618 [9] พบว่าไม่จัดอยู่ในวัสดุปอสโซลานในคลาส N ดังนั้น เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้นำมาทดสอบจึงไม่จัดเป็นวัสดุปอสโซลาน

4.3.3 ตะกั่วเตาหลอมเหล็ก (Granulated Blast Furnace Slag) จากผลการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วเตาหลอมเหล็กพบว่ามีความสารประกอบซิลิกอน ไดออกไซด์ที่สูง ซึ่งจำเป็นต่อการพัฒนากำลังของดินจีโอพอลิเมอร์ แต่มีองค์ประกอบของอลูมินา มีค่าน้อย ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และแคลเซียมออกไซด์ มีค่าน้อยซึ่งช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงอัด แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณในดินลมหอบ (%)	ปริมาณในเถ้าปาล์มน้ำมัน (%)	ปริมาณในตะกั่วเตาหลอมเหล็ก (%)
Al_2O_3	14.48	0.87	5.45
SiO_2	73.91	9.98	67.67
Fe_2O_3	2.01	9.12	4.18
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	90.40	19.96	77.26
SO_3	0.06	2.57	-
CaO	0.06	10.20	2.35

4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เปรียบเทียบกับดินจีโอพอลิเมอร์

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ที่ระยะเวลาบ่ม 27 และ 28 วัน ของดินซีเมนต์และดินจีโอพอลิเมอร์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล.-ม. 204/2556 [1] เพื่อใช้ในชั้นพื้นทางของถนนโดยมีข้อกำหนดของระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 1,724 กิโลปาสกาล

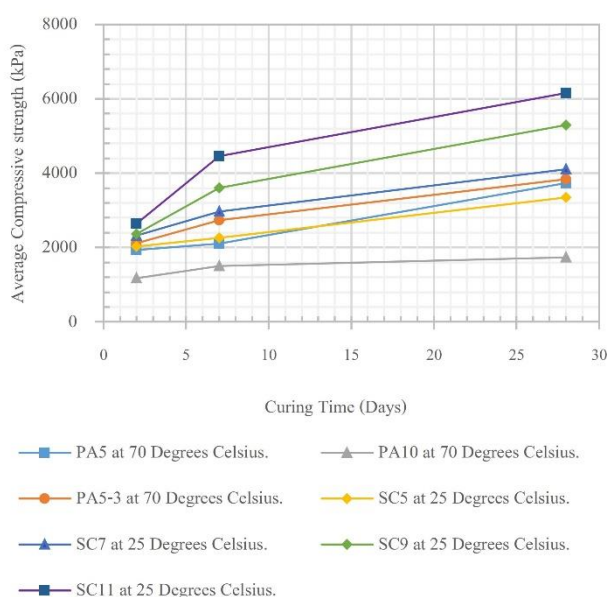
4.4.1 ดินจีโอพอลิเมอร์ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน PA5 และ PA5-3 มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐาน และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินซีเมนต์ SC5 แต่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่า SC7 SC9 และ SC11 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน สำหรับ PA10 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่มากเกินไป แสดงดังรูปที่ 14 สำหรับอัตราส่วนที่ผสมตะกั่วเตาหลอมเหล็กมีสารประกอบของซิลิกอน ไดออกไซด์ที่สูง แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีผลต่อโครงสร้าง

ที่เป็นมาตรฐานทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนผสมเด้าปาล์มเพียงอย่างเดียว โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม

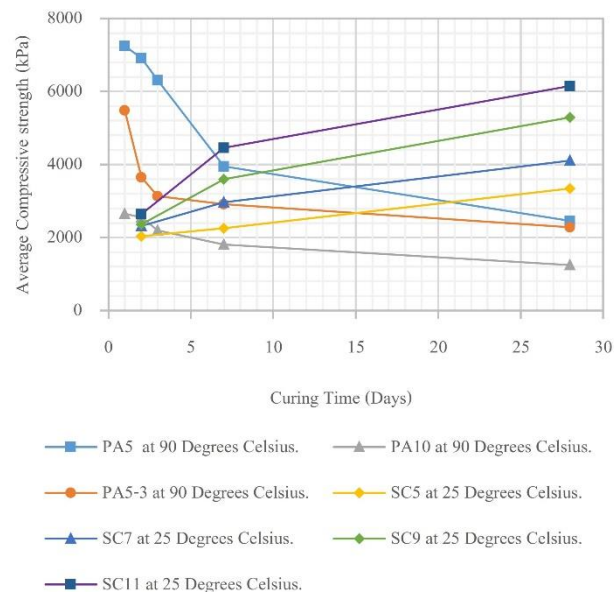
4.4.2 ดินจิโพลีเมอร์ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงสุดในระยะเวลาบ่มที่ 1 วัน ของ PA5 PA10 และ PA5-3 แสดงดังรูปที่ 15 เนื่องจากบ่มที่อุณหภูมิสูงมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาจิโพลีเมอร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงในช่วงแรกมีค่าสูงกว่าดินซีเมนต์ SC5 SC7 SC9 และ SC11 และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการบ่ม อย่างช้าๆ ต่อเนื่องที่ระยะเวลา 7 ถึง 28 วัน

4.4.3 ดินจิโพลีเมอร์ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐาน และ PA5 มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นค่ากำลังลดลงอย่างช้าๆ จนถึงระยะเวลาการบ่ม 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 1.8 และมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าอัตราส่วน SC5 ที่ระยะการบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 16 เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาจิโพลีเมอร์ให้เกิดรอยร้าวที่ตัวอย่างค่ากำลังรับแรงอัดจึงมีแนวโน้มลดลง เหมือนกับบ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่ระยะบ่ม 7 วัน และมีกำลังรับแรงอัดคงที่ไม่ลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

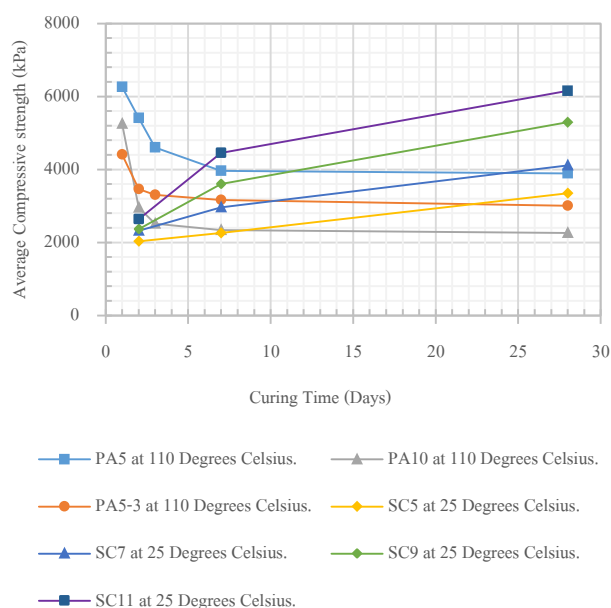
4.4.4 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการเลือกใช้งานคือ PA5 และ PA5-3 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และมีค่ากำลังอัดผ่านมาตรฐาน 1,724 กิโลปาสกาล ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และมีค่ากำลังอัดสูงกว่าของ SC5 ที่ระยะบ่ม 28 วัน



รูปที่ 14 ดินซีเมนต์และดินจิโพลีเมอร์บ่มที่ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 15 ดินซีเมนต์และดินจิโพลีเมอร์บ่มที่ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 16 ดินซีเมนต์และดินจีโอพอลิเมอร์บ่มที่ 110 องศาเซลเซียส

4.5 ผลการทดสอบความคงทนเปียกสลับแห้ง (Wet-dry test)

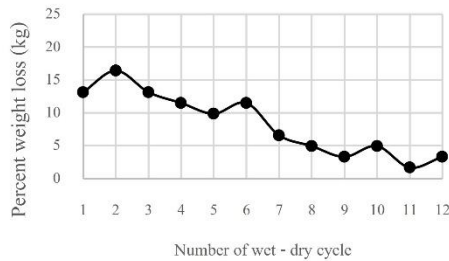
การทดสอบความคงทนเปียกสลับแห้ง ได้คัดเลือกอัตราส่วนผสมมาทดสอบคือ ดินซีเมนต์ SC5 ดินจีโอพอลิเมอร์ PA5 และ PA5-3 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อดูค่าการสูญเสียน้ำหนัก ในอัตราส่วนข้างต้นเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมได้จากการทดสอบ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล.-ม. 204/2556 และมีแนวโน้มของกำลังเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม

4.5.1 ดินซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง (SC5) จากการทดสอบความคงทนเปียกสลับแห้ง พบว่าดินซีเมนต์มีการสูญเสียมวลมากในช่วง รอบที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 16.4 และลดลงอย่างสม่ำเสมอจนถึงรอบที่ 6 มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวล สูงขึ้นร้อยละ 11.5 หลังจากนั้นลดลงอย่างสม่ำเสมอจนครบ 12 รอบ ดังแสดงรูปที่ 17 และ 21 และพบว่าดินซีเมนต์ (SC5) มีการสูญเสียมวลทั้งหมด สูงกว่าดินจีโอพอลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมัน (PA5) และส่วนผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก (PA5-3) ดังแสดงตารางที่ 3 จะเห็นว่าค่าการสูญเสียมวลของดินซีเมนต์มีค่าที่สูงกว่าสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีความชันมาก แสดงดังรูปที่ 20

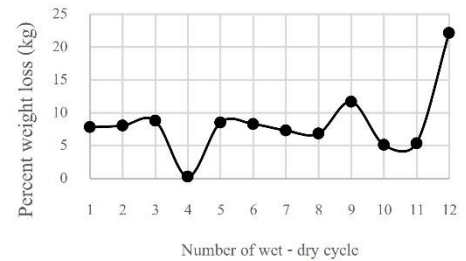
4.5.2 ดินจีโอพอลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมัน 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง (PA5) พบว่ามีการสูญเสียมวลที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงรอบที่ 12 มีค่าการลดลงสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 22.1 เนื่องจากการดูดซับน้ำรอบข้างจึงเกิดร่องมากขึ้นทำให้การยึดเหนี่ยวของดินกับจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง แสดงไว้ดังรูปที่ 18 และ 22

4.5.3 ดินจีโอพอลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมันผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก 5 กับ 3 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง (PA5-3) พบว่ามีการสูญเสียมวลสูงสุดในรอบที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 12.9 และรอบที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 11.9 หลังจากนั้นมีการสูญเสียมวลลดลงเปอร์เซ็นต์ของมวลที่หายไปมีค่าน้อย เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กเมื่อผ่านระยะเวลาการบ่มจะสามารถพัฒนากำลังได้สูง จึงทำให้ในช่วงรอบที่ 3 ถึง 12 มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลที่ลดน้อยลง แสดงไว้ดังรูปที่ 19 และ 23

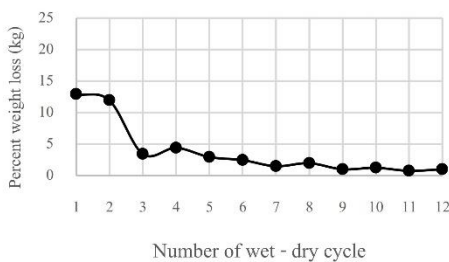
4.5.4 ดินซีเมนต์ และดินจีโอพอลิเมอร์ พบว่าดินจีโอพอลิเมอร์เฝ้าป่าลมน้ำมัน 5 เปอร์เซนต์ (PA5) และอัตราส่วนผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก 5 กับ 3 เปอร์เซนต์ (PA5-3) มีการสูญเสียมวลน้อยกว่าดินซีเมนต์ 5 เปอร์เซนต์ (SC5) ดังตารางที่ 3



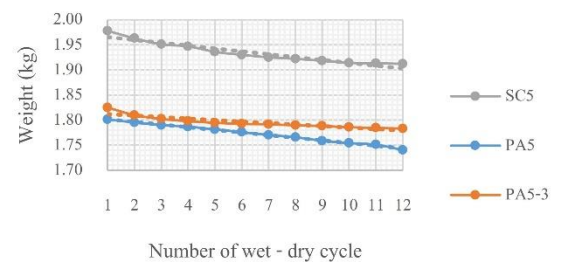
รูปที่ 17 เปอร์เซนต์การสูญเสียมวลของดินซีเมนต์ SC5



รูปที่ 18 เปอร์เซนต์การสูญเสียมวลของดินจีโอพอลิเมอร์ PA5



รูปที่ 19 เปอร์เซนต์การสูญเสียมวลของดินจีโอพอลิเมอร์ PA5-3



รูปที่ 20 การสูญเสียมวลของดินซีเมนต์ SC5 และดินจีโอพอลิเมอร์ PA5 และ PA5-3



รูปที่ 21 ตัวอย่างทดสอบหลังชุดของดินซีเมนต์ SC5



รูปที่ 22 ตัวอย่างทดสอบหลังชุดของดินจีโอพอลิเมอร์ PA5



รูปที่ 23 ตัวอย่างทดสอบหลังชุดของดินจีโอพอลิเมอร์ PA5-3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเป็ยกลลับแห่งจากการสูญเสียมวลของดินซีเมนต์และดินจีโอพอลิเมอร์

Name	Unconfined Compressive Strength (kPa) at 7 days	Percent of max Loss (%)
ดินซีเมนต์, SC5	2,260.62	11.06
ดินจีโอพอลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมัน, PA5	2,107.63	7.48
ดินจีโอพอลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมันผสมตะกอนเตาถลุงเหล็ก, PA5-3	2,732.18	7.75

5. สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สมบัติของดินลมหอบ

จากการทดสอบสมบัติของดินลมหอบพบว่าเป็นดินชนิด Silty Sand (SM) จำแนกด้วยระบบ USCS มีค่าพิคต์เหลวร้อยละ 17.6 จะเห็นว่าค่าพิคต์เหลวในดินลมหอบมีค่าน้อย จึงทำให้มีความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินน้อยหลุ่คร่อนได้ง่าย

5.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ามีสารประกอบของ ซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินา มีปริมาณน้อยและมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าเล็กน้อย จึงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยเนื่องจากการทำปฏิกิริยา จำเป็นต้องมีส่วนประกอบของธาตุซิลิกา ในการทำปฏิกิริยาเป็นหลัก สำหรับในอัตราส่วนที่ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กพบว่ามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มีมากสูงถึง 53.02 เปอร์เซ็นต์ จึงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูง

5.3 กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเทียบระหว่างดินซีเมนต์และดินจีโอพอลิเมอร์

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ และดินจีโอพอลิเมอร์ ในมาตรฐานชั้นพื้นทางกรมทางหลวงพบว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ ที่ 5 7 9 และ 11 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง ผ่านมาตรฐานกำลังรับแรงอัด 1,724 กิโลปาสกาล ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน สำหรับดินจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง และอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับตะกอนเตาถลุงเหล็ก 5 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐาน และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินแห้ง ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เนื่องจากอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ได้สนับสนุนงานวิจัยของ Moslih และคณะ [5] ที่ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 70 องศาเซลเซียส และ เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อในการทำปฏิกิริยาค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงระยะเวลา วันที่ 7 และ 28 วันจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

5.4 ความคงทนเป็ยกลลับแห่งของดินซีเมนต์และดินจีโอพอลิเมอร์

จากผลการทดสอบความคงทนเป็ยกลลับแห่งพบว่าดินจีโอพอลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมัน 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้งมีการสูญเสียมวลน้อยกว่าดินจีโอพอลิเมอร์เถ้าปาล์มน้ำมันผสมตะกอนเตาถลุงเหล็ก 5 กับ 3 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดินแห้ง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาในช่วงแรงของอัตราส่วนที่ผสมตะกอนมีการทำปฏิกิริยาที่ช้ากว่าจึงทำให้ในช่วงแรกมีการสูญเสียมวลที่มาก หลังจาก

นั้นผ่านกระบวนการที่ใช้มีอุณหภูมิในเตาอบตามมาตรฐาน ASTM D559 จึงเป็นการเร่งปฏิกิริยาทำให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จึงทำให้หลังจากช่วงแรก มีค่าการสูญเสียมวลที่ลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง. มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2556. มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (*Soil cement Base*). สำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, 2556.
- [2] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, สุเชษฐ์ เอี่ยมเชย. ความคงทนของดินซีเมนต์. รายงานฉบับที่ วว. 120 กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง, 2532.
- [3] พัทธราภรณ์ ธรรมบำรุง. การศึกษาคุณสมบัติของซีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาว เถ้าปาล์ม และของเสีย กากชีปะขาว. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2558.
- [4] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. วัสดุซีโอโพลิเมอร์. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2560.
- [5] Salih, M. A., Farzadnia, N., Abang Ali, A. A., and Demirboga, R. Effect of different curing temperatures on alkali activated palm oil fuel ash paste. *Construction and Building Materials*, 2015, 94, pp.116–125.
- [6] Kubba, Z. et al. Impact of Curing Temperatures and Alkaline Activators on Compressive Strength and Porosity of Ternary Blended Geopolymer Mortars. *Case Studies in Construction Materials*, 2018, 9, e00205.
- [7] Ameri, F., Parham, S., Seyed, A. Z., and Babak, B. Geopolymers vs. Alkali-Activated Materials (AAMs): A Comparative Study on Durability, Microstructure, and Resistance to Elevated Temperatures of Lightweight Mortars. *Construction and Building Materials*, 2019, 222 (20), pp.49–63.
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM Standard D559 *Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C 618-03 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw Calcined Natural Pozzolan for use Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. [n.p.]: Annual Book of ASTM Standard, 1997.

