



ผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และ
จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

EFFECT OF WET-DRY CONDITION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SOIL IMPROVEMENT
WITH CEMENT AND FLY ASH-BASED GEOPOLYMER

ชินวัตร ศรีชาติ¹ และดลฤดี หอมดี^{2*}

¹นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ถูกใช้ในการปรับปรุงดินเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ยังคงส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม จึงได้มีการนำจีโอโพลิเมอร์มาแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการปรับปรุงดินที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ งานวิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมมีค่าเท่ากับ 5 7 9 และ 11 เปอร์เซ็นต์โดยมวล และปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสมมีค่าเท่ากับ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกันในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์ อายุบ่มเท่ากับ 2 7 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างแต่ละส่วนผสมไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดเพื่อหาส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง จากนั้นนำส่วนผสมที่ผ่านไปทดสอบความคงทนด้วยสภาพเปียกสลับแห้ง โดยจะแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองชุด ชุดที่หนึ่งทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดของตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้งและชุดที่สองจะหาความคงทนของตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดดินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านสภาพเปียกสลับแห้งและมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลเท่ากับ 11.06 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านสภาพเปียกสลับแห้งและมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลเท่ากับ 6.80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นดินจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มที่จะสามารถทนต่อสภาพเปียกสลับแห้งได้ดีกว่าดินซีเมนต์

คำสำคัญ: การปรับปรุงเสถียรภาพของดิน; ดินซีเมนต์; จีโอโพลิเมอร์; เถ้าลอย

ABSTRACT

At present, Ordinary Portland Cement has been widely used to improve the soil for highway base course. However, cement manufacturing process impacted on the environment. Geopolymer was chosen to replace the Ordinary Portland Cement for soil improvement in this research. This research was aimed to study the effect of wet-dry condition on unconfined compressive strength

Chinnawat Srirach¹ and Dolrerdee Hormdee^{2*}

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

²Asst. Prof. Dr., Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

(UCS) of soil stabilized with Portland cement and fly ash-based geopolymer. Percentage of cement was 5 7 9 and 11 by mass and percentage of fly ash was 10 20 and 30 by mass. NaOH solution of 10 molar and various mix design at different fly ash/alkali activator ratio and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio were used to preparation specimens and cured for 2 7 and 28 days at room temperature. Each mixture was tested for UCS in accordant to the soil cement standard from the Portland Cement Association was used to perform wet-dry condition test. Wet-dry condition test was divided into 2 sets. The first set was used to conduct the UC test after through the process and the second set was determined the durability of the specimens. The results, revealed that the compressive strength of soil cement tended to decrease after processing and the mass loss percentage was 11.06. The unconfined compressive strength (UCS) of soil geopolymer tended to increase after the wet and dry condition and the mass loss percentage was 6.80. It was concluded that soil geopolymer exhibited the performance in withstanding the wet and dry condition better than soil cement.

KEYWORDS: soil improvement; soil cement; geopolymer; fly ash

1. บทนำ

ดินซีเมนต์ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ เกิดขึ้นจากการนำดินที่สามารถหาได้ทั่วไปในท้องถิ่นมาผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ [1] ซึ่งใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำและสามารถทำได้โดยง่าย ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำดินซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ เช่น การทำชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง ทำอิฐบล็อกหรือกระเบื้อง ทดแทนวัสดุเดิมเช่น ลูกกรง หรือ หินคลุก แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ต้องใช้พลังงานที่สูงและก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมลภาวะทางอากาศส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน ต่อมาได้มีการนำจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) มาใช้ทดแทนซีเมนต์ในงานก่อสร้าง โดยจีโอโพลิเมอร์นั้นเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก โดยอาศัยสารละลายต่างและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จะเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อย ดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ทั้งยังช่วยลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตของซีเมนต์ [2] Ubolluk Rattanasak and Prinya Chindaprasirt [3] ได้ศึกษาการชะของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดสอบพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ สามารถชะออกของซิลิกาและอะลูมินาออกมาได้มากที่สุด ต่อมา ศราวุฒิ อภิเนตร และ เจริญชัย ฤทธิรัฐ [4] ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของดินลมหอบขนกันด้วยการปรับปรุงคุณสมบัติจากการผสมวัสดุประสานประเภทจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยดินลมหอบขนนั้นมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินน้อยมากและสามารถพังทลายได้ง่ายเมื่อมีความชื้นสูงขึ้น [5] จึงควรมีการปรับปรุงคุณสมบัติก่อนนำไปใช้งาน ตัวอย่างดินปรับปรุงด้วยการเติมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเท่ากับ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยมวลและทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินลมหอบที่ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาอายุของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น ทำให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดสูงเพิ่มขึ้นเมื่อผสมจีโอโพลิเมอร์เท่ากับ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล นอกจากนี้ Abdullah and Ahmad [6] ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายอัลคาไล อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการบ่มต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2 ต่อ 1 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีสภาพอากาศร้อนชื้น ในงานก่อสร้างถนน วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทางจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ และอาจทำให้เกิดปัญหาการพังและการทรุดตัวของถนนเนื่องจากชั้นพื้นทางที่ได้ออกแบบไว้รับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยกว่าที่กำหนด จิระยุทธ สืบสุข และ อัครเดช ศิริพันธุ์ [7] ได้ศึกษาผลของสภาพเปียกสลับแห้งต่อกำลังของชั้นพื้นทางดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง เนื่องจากพันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินถูกทำลายจากสภาพเปียกสลับแห้ง ทำให้เกิดความพรุนในตัวอย่างมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

ดังนั้นเพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงในสนามของวัสดุในการก่อสร้างชั้นทางภายในห้องปฏิบัติการ จากการเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเรียกว่า สภาพเปียกสลับแห้ง (Wet-dry condition) ซึ่งจะใช้การทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wet-dry test) ตามมาตรฐาน ASTM D559 [8] ทางผู้วิจัยจะทำการศึกษาผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอย

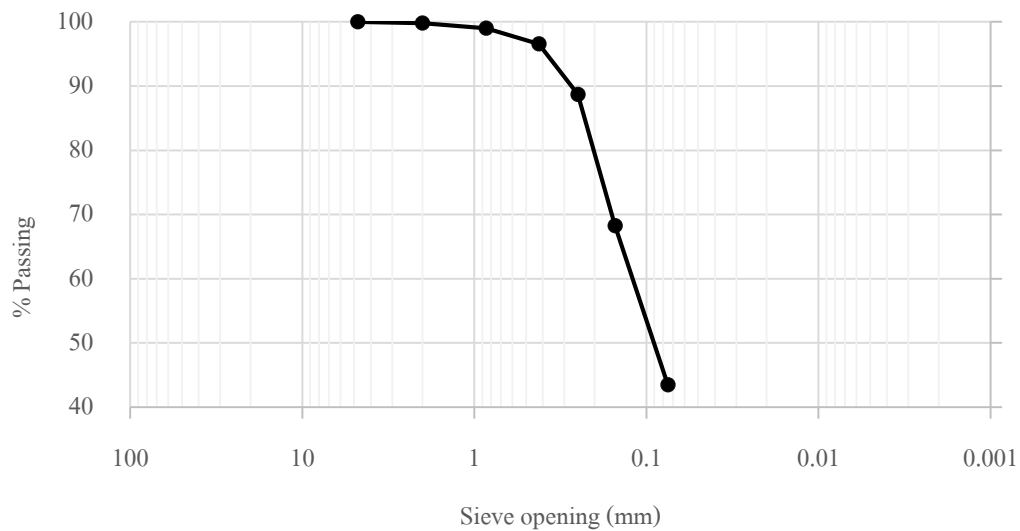
2. วัสดุและการทดสอบ

2.1 ดิน

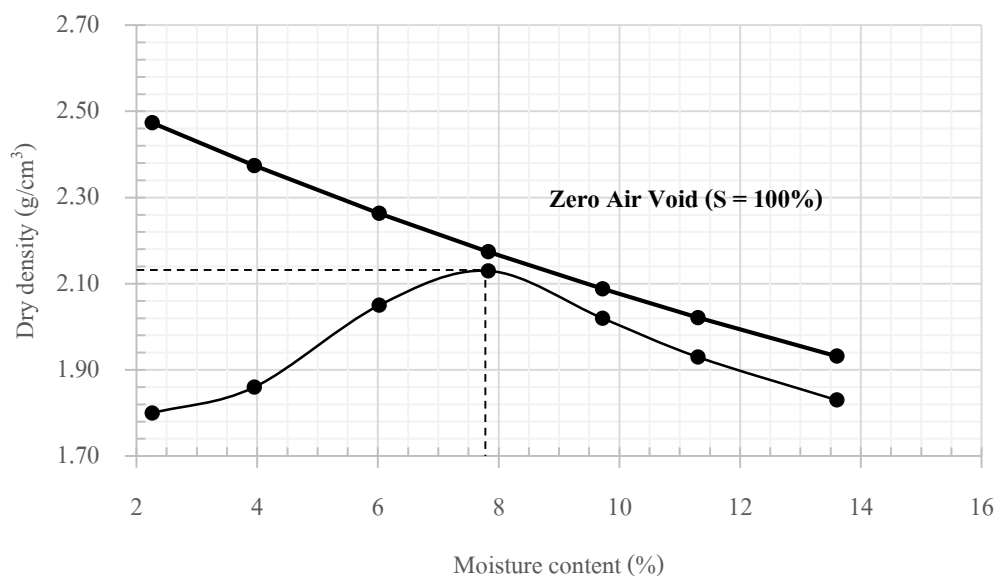
ดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินลมหอบที่เก็บมาจากภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 มีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 43.50 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 1 ค่าพิกัดเหลวเท่ากับ 17.6 เปอร์เซ็นต์และค่าดัชนีสภาพพลาสติกเท่ากับ NP จำแนกด้วยระบบ UCSC ได้เป็นดินชนิด Silty Sand (SM) และจำแนกด้วยระบบ AASHTO ได้เป็นดินชนิด A-4 ดังตารางที่ 1 และผลการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM D1557 [9] ดังรูปที่ 2 มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับ 7.80 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติของดิน

สมบัติของดิน	ค่า
เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 4, %	100.00
เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 200, %	43.50
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)	2.62
พิกัดเหลว (Liquid Limit), %	17.6
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit), %	NP
ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index), %	NP
Unified Soil Classification System	SM
AASHTO Classification System	A-4
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) , g/cm ³	2.13
ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content), %	7.80



รูปที่ 1 การกระจายตัวของดินลมหอบ



รูปที่ 2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลมหอบ

2.2 แก้วลอย

แก้วลอยที่ใช้ในการศึกษาเป็นแก้วลอยนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ นำไปหาหาค่าประกอบทางเคมีของแก้วลอย วิเคราะห์ออกมาในรูปแบบสารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่องมือ XRF (X-ray fluorescence) ดังแสดงในตารางที่ 2 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าแก้วลอยมีค่าผลรวมปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ และค่าซิลเฟอร์ไดรอกไซด์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จำแนกด้วยมาตรฐาน ASTM C618 [10] ได้เป็นแก้วลอยชนิด C

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ XRF ของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO
ปริมาณ (%)	16.99	30.04	13.60	60.63	4.93	20.46

สำหรับกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ จะนำเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินามาผสมกับสารละลายอัลคาไล โดยสารละลายเบสจะทำหน้าที่ชะอ็อกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากเถ้าลอย สารละลายโซเดียมซิลิเกตจะช่วยให้การก่อตัวของเจลจีโอโพลิเมอร์ และมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลผลิตออกมาเป็นจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในสมการที่ 1



2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัด (Unconfined compression test)

การทดสอบกำลังรับแบบไม่มีการโอบรัดเป็นการทดสอบเพื่อหาลำดับรับแรงอัดของตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D2166 [11] และมีตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3 บดอัดลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร และบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 2 7 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 ตารางส่วนผสมของตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณซีเมนต์โดยมวล (%)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของน้ำ (%)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของสารละลาย (%)	ปริมาณเถ้าลอยโดยมวล (%)	อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์
SC05	5	OMC	-	-	-
SC07	7	OMC	-	-	-
SC09	9	OMC	-	-	-
SC11	11	OMC	-	-	-
FA101	-	-	OLC ¹	10	1:1
FA102	-	-	OLC ¹	10	2:1
FA103	-	-	OLC ¹	10	3:1
FA201	-	-	OLC ²	20	1:1
FA202	-	-	OLC ²	20	2:1
FA203	-	-	OLC ²	20	3:1
FA301	-	-	OLC ³	30	1:1

ตารางที่ 3 ตารางส่วนผสมของตัวอย่าง (ต่อ)

ชื่อ ตัวอย่าง	ปริมาณซีเมนต์ โดยมวล (%)	ปริมาณความชื้นที่ เหมาะสมของน้ำ (%)	ปริมาณความชื้นที่ เหมาะสมของสารละลาย (%)	ปริมาณเถ้า ลอยโดยมวล (%)	อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์
FA302	-	-	OLC ³	30	2:1
FA303	-	-	OLC ³	30	3:1

*หมายเหตุ OMC = 7.8 %, OLC¹ = 12.3 %, OLC² = 14.3 %, OLC³ = 16.2 %

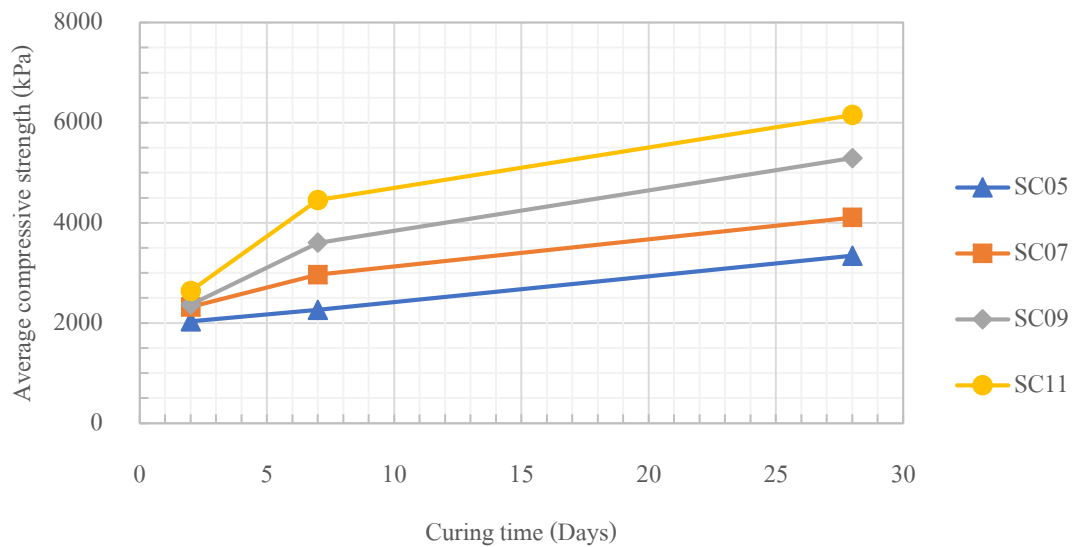
2.4 การทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wet-dry test)

การทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้งจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D559 [8] โดยทดสอบในส่วนผสมของตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดเกิน 1724 kPa ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม.204/2556) [12] โดยการเตรียมตัวอย่างจะแบ่งเป็นสองชุด ชุดที่หนึ่งจะทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง และชุดที่สองจะทดสอบหาเปอร์เซ็นต์มวลที่หายไปของตัวอย่างหลังจากผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง

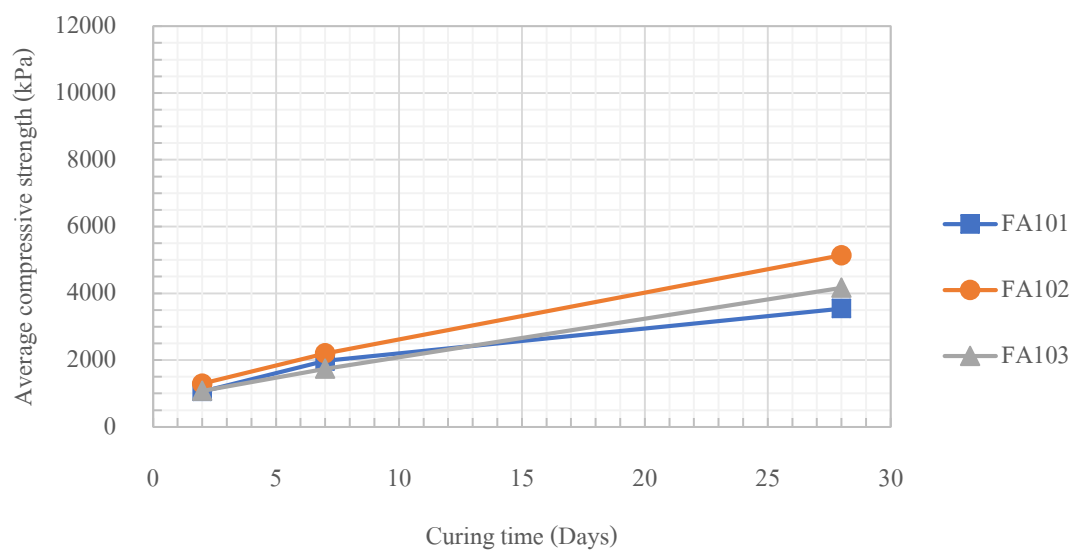
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัด

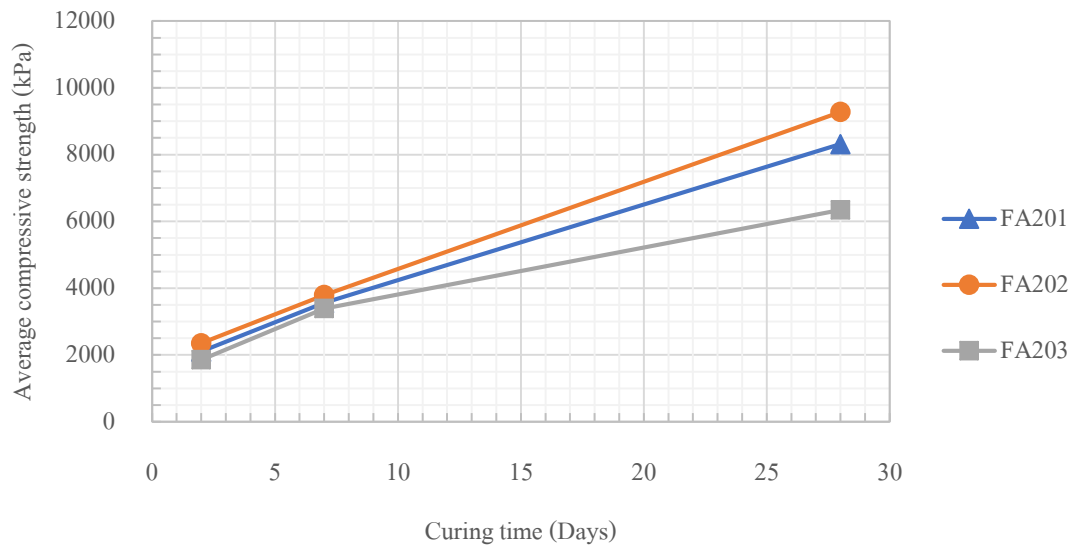
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุบ่มของดินซีเมนต์ จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม เมื่อมีปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากในช่วงอายุการบ่ม 2 วัน ไปที่อายุการบ่ม 7 วัน จากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดที่ ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 11 เปอร์เซ็นต์โดยมวลและมีอายุบ่มเท่ากับ 28 วัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดของดินที่ปรับปรุงจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 4 - 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสมจะเป็นการเพิ่มปริมาณซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายอัลคาไล ทำให้มีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดของดินจีโอโพลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์จากอัตราส่วนเท่ากับ 1 ต่อ 1 ไปจนถึงอัตราส่วนเท่ากับ 2 ต่อ 1 เนื่องจากปริมาณของโซเดียมซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มซิลิกาที่ไปทำปฏิกิริยากับอะลูมินาในเถ้าลอยเกิดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วนเท่ากับ 2 ต่อ 1 ไปจนถึงอัตราส่วนเท่ากับ 3 ต่อ 1 เนื่องจากปริมาณของโซเดียมซิลิเกตที่มากเกินไปโซเดียมไฮดรอกไซด์มีมากเกินไป ทำให้ตัวอย่างมีความหนืดมากขึ้นและทำปฏิกิริยาได้น้อยลงจากการที่โซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยลงทำให้การชะละลายในเถ้าลอยน้อยลงตาม ค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดที่ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลและมีอายุบ่มเท่ากับ 28 วัน อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดีที่สุดเท่ากับ 2 ต่อ 1



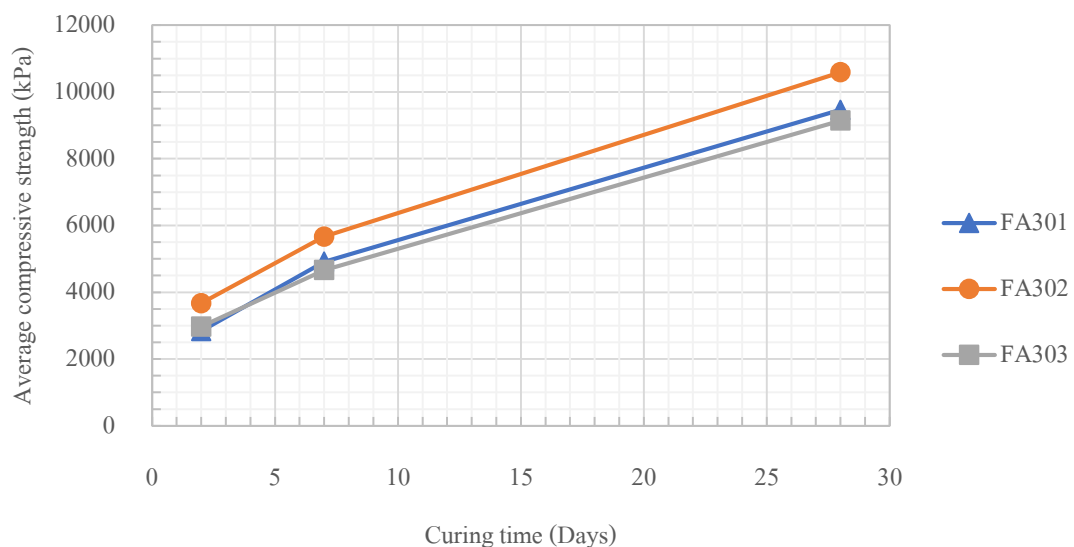
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุบ่มของดินซีเมนต์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 10 เปอร์เซนต์โดยมวล



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 20 เปอร์เซนต์โดยมวล

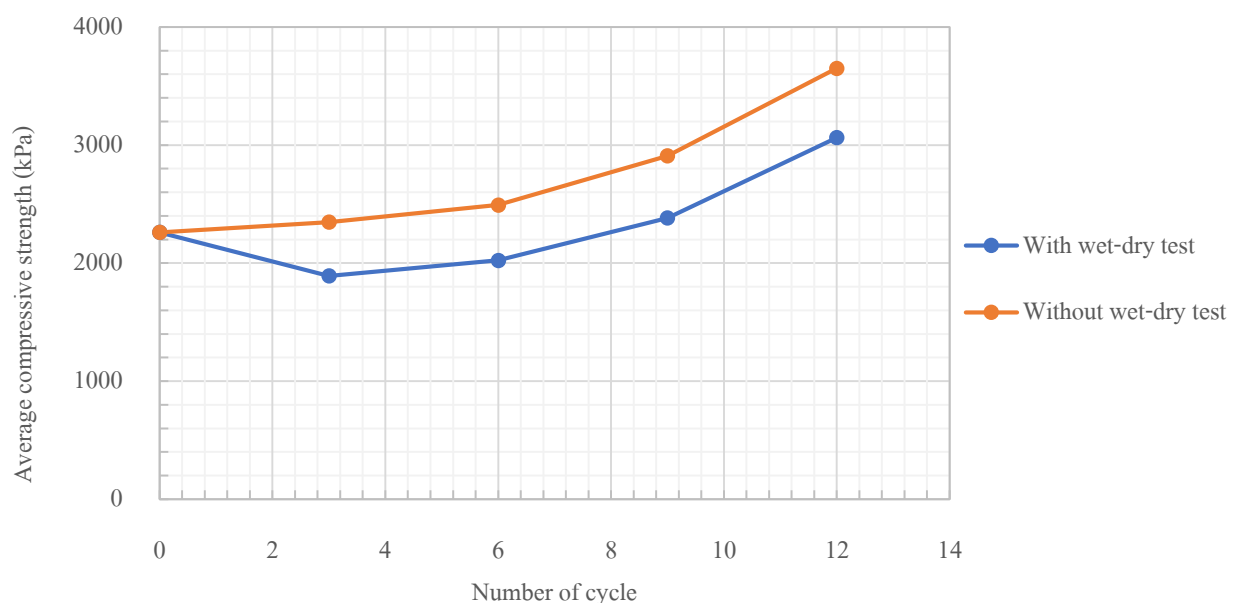


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 30 เปอร์เซนต์โดยมวล

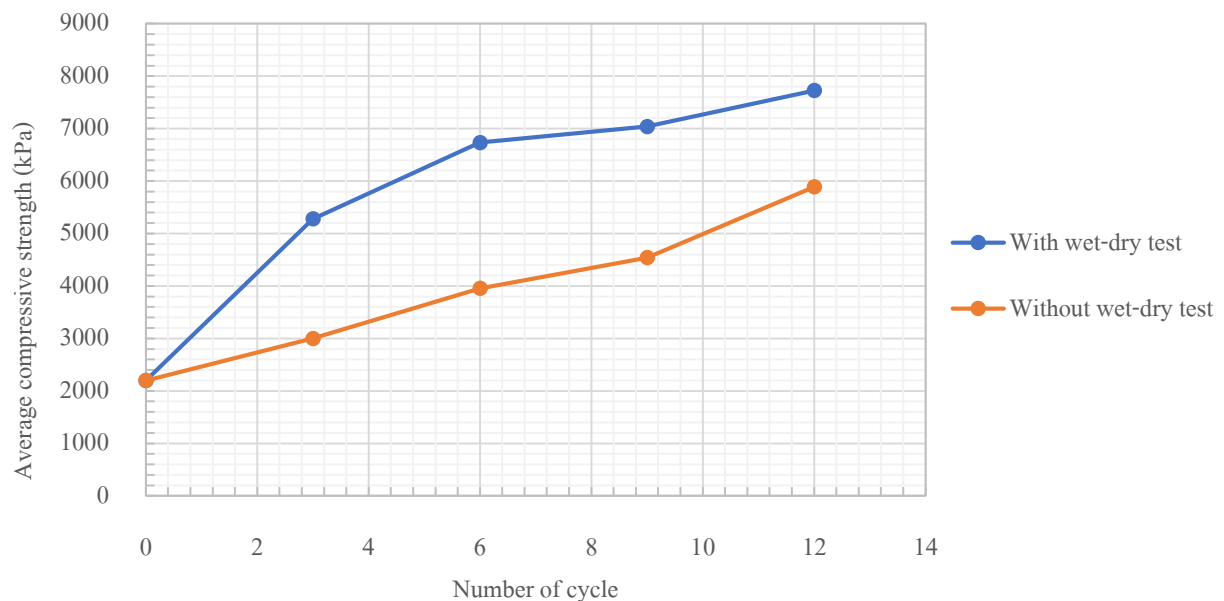
3.2 ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wet-dry test)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดของดินที่ปรับปรุงซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในแต่ละอายุการบ่ม เลือกส่วนผสมของดินซีเมนต์และดินจีโอโพลิเมอร์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดเกิน 1724 kPa ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม.204/2556) [10] ในส่วนของดินซีเมนต์จะเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5 เปอร์เซนต์โดยมวล และของดินจีโอโพลิเมอร์จะเลือกใช้ปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 10 เปอร์เซนต์โดยมวลและใช้สารละลายอัลคาไลที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2 ต่อ 1

โดยคำนึงถึงความพอเหมาะต่อการนำไปใช้งาน ผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองชุด โดยชุดที่หนึ่งจะเป็นผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดและชุดที่สองจะเป็นผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อความคงทนของตัวอย่างโดยแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์มวลที่สูญเสียไป ซึ่งผลการทดสอบผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยแสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ และผลการทดสอบความคงทนแสดงดังตารางที่ 4 จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ากรณีของดินซีเมนต์ในช่วงรอบการทดสอบที่ 0 ถึง 3 รอบ ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านเนื่องจากตัวอย่างเกิดการผุกร่อนจากสภาพเปียกสลับแห้ง ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยช่องว่างในตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้มากขึ้น จากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงรอบการทดสอบที่ 3 จนถึง 12 จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่ดูดซึมในสภาพเปียกสลับแห้ง แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ไม่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่ากรณีของดินจีโอโพลิเมอร์ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงรอบการทดสอบที่ 12 รอบและมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่าน เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้อบตัวอย่างระหว่างการทดสอบเป็นอุณหภูมิที่พอเหมาะต่อการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างจึงสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เพิ่มมากขึ้นและมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4 ดินจีโอโพลิเมอร์มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียโดยมวลน้อยกว่าดินซีเมนต์ แสดงถึงความคงทนต่อสภาพเปียกสลับแห้งได้ดีกว่าดินซีเมนต์



รูปที่ 7 ผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์



รูปที่ 8 ผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินจิโอโพลิเมอร์

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความคงทนของดินซีเมนต์และดินจิโอโพลิเมอร์

ชื่อตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัดที่ ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (kPa)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวล (%)
ดินซีเมนต์	2,261	11.06
ดินจิโอโพลิเมอร์	2,198	6.80

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจิโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัด ผลที่ได้พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจิโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มและปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผสม เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้น และอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผสมให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดเท่ากับ 2 ต่อ 1 จากนั้นเลือกส่วนผสมสำหรับนำไปทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้งที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่มเท่ากับ 7 วัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยคำนึงถึงความพอเหมาะต่อการนำไปใช้งาน ในส่วนของดินซีเมนต์จะเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 2,261 kPa และของดินจิโอโพลิเมอร์จะเลือกใช้ปริมาณถ้ำลอยเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 2,198 kPa

จากผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง ผลที่ได้พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง เนื่องจากเกิดความพรุนจากสภาพเปียกสลับแห้งและมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลเท่ากับ 11.06 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในสภาพเปียกสลับแห้งช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ ทำให้เกิดวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลเท่ากับ 6.80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการปรับปรุงดินด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่ากับดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และทนต่อสภาพเปียกสลับแห้งได้มากกว่าดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สุเชษฐ์ เอี่ยมเมข. รายงาน ฉบับที่ วว. 120 ความคงทนของดินซีเมนต์. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง สำนักวิจัยและพัฒนา งานทาง, 2532.
- [2] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. วัสดุจีโอโพลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2560.
- [3] Ubolluk, R. and Prinya, C. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Mineral Engineering* 22, 2009, 14. pp. 143-49.
- [4] ศราวุฒิ อภิเนตร และ เจริญชัย ฤทธิรุท. การปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของดินลมหอบขนแกนด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*, 21 กรกฎาคม 2560, pp. 28-34.
- [5] Phien-wej, N. et al. Collapse and strength characteristics of loess in Thailand. *Engineering Geology*, 1992, 32, pp. 59-72.
- [6] Muhammad, SA. and Fauziah, A. Effect of Alkaline Activator to Fly Ash Ratio for Geopolymer Stabilized Soil. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 97, pp. 1-8. DOI: 10.1051/mateconf/20179701012.
- [7] จิระยุทธ สืบสุข และ อัครเดช ศิริพันธุ์. ผลของวัฏจักรเปียกสลับแห้งต่อกำลังของวัสดุพื้นทางดินลูกรังปรับปรุงด้วยซีเมนต์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2017, 24 (3), pp. 142-49.
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM Standard D559. *Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*. West Conshohocken, PA, USA, 2003.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM Standard D1557. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. West Conshohocken, PA, USA, 2007.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM Standard C618. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM Standard D2166. *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. West Conshohocken, PA, USA, 2013.
- [12] กรมทางหลวง. ทล.-ม. 204/2556: 2556. *มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)*. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, 2556.

