



การปรับปรุงสมบัติการรับแรงอัดและความคงทนของชั้นพื้นทางด้วยจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้เถ้าขาน้อยและเถ้าแกลบ IMPROVEMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH AND DURABILITY FOR BASE COURSE WITH GEOPOLYMER MATERIALS BY USING BAGASSE ASH AND RICE HUSK ASH

อรรถพล พระโคตร¹ และ ดลฤดี หอมดี^{2*}

¹นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

บทคัดย่อ

ดินลมหอบในสภาพแห้งจะมีการสูญเสียค่ากำลังรับน้ำหนักมากและมีลักษณะการทรุดตัวจากการยุบตัวเมื่อมีปริมาณความชื้นในดินเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการปรับปรุงดินลมหอบด้วยวัสดุจีโอโพลีเมอร์ที่นำเถ้าขาน้อยและเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมในดิน โดยเทียบกับมาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง ทล.-ม.204/2556 โดยการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดไร้ขอบเขต และการทดสอบความคงทนเปียกสลับแห้ง ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างถูกควบคุมบดอัดดินที่ 95 เปอร์เซ็นต์การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ด้วยปริมาณของเหลวที่เหมาะสม สำหรับวัสดุจีโอโพลีเมอร์ใช้อุณหภูมิในการบ่มร้อนที่ 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเป็นการบ่มอุณหภูมิห้องปกติจนมีระยะบ่มรวม 2, 7 และ 28 วันตามลำดับ ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:3 ซึ่งการทดสอบได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุบ่มของดินจีโอโพลีเมอร์ในแต่ละอุณหภูมิพบว่า ที่ระยะบ่ม 7 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ในสัดส่วนผสม BA10RH5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงขึ้น ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในสัดส่วนผสม BA10 และมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของ SC5 ส่วนการทดสอบความคงทนวิธีเปียกสลับแห้งโดยเลือกดินจีโอโพลีเมอร์ BA10 ที่อุณหภูมิบ่ม 90 องศาเซลเซียส และ BA10RH5 ที่อุณหภูมิบ่ม 70 องศาเซลเซียส และดินซีเมนต์ SC5 มาเปรียบเทียบกัน ซึ่ง พบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของดินซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 11.06 ซึ่งมากกว่า ดินจีโอโพลีเมอร์ BA10 ที่อุณหภูมิบ่ม 90 องศาเซลเซียส และ BA10RH5 ที่อุณหภูมิบ่ม 70 องศาเซลเซียส ที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 4.57 และ 9.05 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด; เถ้าขาน้อย; เถ้าแกลบ; ความคงทน

ABSTRACT

Loess soil in dry condition is easily lost its strength and collapsed when increased its moisture content for a sufficient time. The objective of this research is to study the improvement of the loess soil with bagasse and rice husk ash-based geopolymer material, compared with the standard of Department of Highways dh-s. 204/2556 for soil cement. The unconfined compression test and durability test in term of wet-dry process method were conducted in laboratory. The specimens were prepared as 95% modified

compaction with optimum liquid content. For geopolymer, curing temperature of 70, 90 and 110 °C were used for 1 day then curing with room temperature up to 2, 7 and 28 days for curing time, respectively. The ratio of sodium silicate and sodium hydroxide of 1:3 is used. The results shown that for 7-day curing time, the maximum compressive strength was obtained from the lower percentage of bagasse ash with rice husk ash, BA10RH5 at the curing temperature of 70 °C but at higher curing temperature, the maximum compressive strength was obtained from the lower percentage of bagasse ash without rice husk ash, BA10 and that compressive strength were more than the compressive strength of soil-cement, SC5. In term of durability, the SC5, BA10-70 and BA10RH5-90 were chosen using wet-dry method. The percentage of loss in SC5 is 11.06% that was more than those of BA10-70 and BA10RH5-90 as 4.57% and 9.05%, respectively. The results of percentage of loss were related to their corresponding compressive strength.

KEYWORD: loess; bagasse ash; rice husk ash; unconfined compressive strength; geopolymer

1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน มีจำนวนโครงการที่ก่อสร้างและบำรุงดูแลรักษาถนนเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเจริญเติบโตและการพัฒนาของประเทศ ทำให้ต้องการใช้วัสดุทดแทนร่วมกันเพื่อใช้ในงานก่อสร้างมากขึ้นตามไปด้วย วัสดุในงานก่อสร้างถนนอย่างหินคลุกถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนน แต่ในบางครั้งแหล่งวัสดุที่นำมาก่อสร้างนั้นมีอยู่อย่างจำกัดและยังมีราคาสูง ต้องไปหาแหล่งที่อื่น ทำให้การก่อสร้างบางโครงการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุที่สูงและเกินความจำเป็น จึงนำไปสู่ความล่าช้าในเรื่องเวลา ทำให้โครงการไม่สำเร็จตามแผนงานที่วางไว้ อีกทั้งขบวนการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น มีการระเบิดภูเขาในแหล่งวัสดุ

ดังนั้นในงานก่อสร้างที่มีปริมาณวัสดุคัดเลือกในจำนวนจำกัด จึงจำเป็นต้องมีวัสดุมาทดแทน หรือเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการปรับปรุงคุณภาพดินในชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ชั้นพื้นทาง (Base) [1] คือ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ ซึ่งใช้สัดส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำที่เหมาะสมแล้วไปผสมกับดินที่เตรียมไว้ [2] ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มาจากกระบวนการเผาของสารประกอบได้แก่ ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก อุณหภูมิการเผาของสารประกอบดังกล่าวอยู่ที่ประมาณ 1400 – 1600 องศาเซลเซียส กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นจึงต้องใช้พลังงานสูงมาก ไม่ว่าจะเป็นการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา รวมไปถึงการบดละเอียด และอีกประการหนึ่งว่าการใช้ผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลเสียต่อบรรยากาศและทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Green House Effect) ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดและวิธีการที่จะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยพยายามหาวัสดุเชื่อมประสาน (Cementation Material) ตัวอื่นที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้ของเหลือจากอุตสาหกรรม เกษตรกรรม รวมถึงจากธรรมชาติที่สามารถมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ และสารผสมดังกล่าวเรียกว่า วัสดุพอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเอง แต่หากผสมกับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) จะสามารถก่อตัวและแข็งตัว จนพัฒนากำลังได้ คล้ายกับวัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและพัฒนาวัสดุเชื่อมประสาน (Cementation Material) ที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ แต่ใช้สารพอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักในการทำวัสดุซีเมนต์ ที่เรียกว่า [3] จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จีโอโพลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยจะใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Polymer) และในการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al จะใช้

สารละลายที่มีสภาพความเป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น ทำให้เกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังรับแรงอัดได้ โดยจะใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Polymer) ดังสมการ (1)

$$M_n [-(Si-O)_2-Al-O]_n \cdot wH_2O \quad (1)$$

โดยที่ M คือ ธาตุอัลคาไล
O คือ ธาตุออกซิเจน
z คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
- คือ การยึดเกาะของพันธะ (Bond)
n คือ ปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่
w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สารปอชโซลานนอกจากเถ้าถ่านหินลิกไนต์มีอยู่มากในประเทศไทยแล้ว ยังมีเถ้ามวลชีวภาพ เช่น เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) โดยชานอ้อยเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลและเมื่อนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจะเกิดเป็นเถ้าชานอ้อยขึ้น เถ้าชานอ้อยที่เกิดขึ้นนี้มีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย โดยส่วนใหญ่จะนำไปกำจัดทิ้ง นอกจากนี้เถ้าชานอ้อยยังก่อให้เกิดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ผลกระทบจากฝุ่นละอองของเถ้าชานอ้อย หรือการชะล้าง เนื่องจากน้ำฝนในขณะกองเก็บ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินจิโอโพลิเมอร์ของดินลมหอบที่ปรับปรุงด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบจําเป็นวัสดุปอชโซลานดั้งเดิม เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่มีสมบัติที่เหมาะสมในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดในการใช้งานการวิเคราะห์ห่อแบบของชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงต่อไป โดยจะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Test) ระหว่างดินจิโอโพลิเมอร์และดินซีเมนต์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล.-ท 105/2515 [4] และการทดสอบสภาพเปียกสลับแห้ง [5]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดของวัสดุจิโอโพลิเมอร์ของดินลมหอบที่ปรับปรุงด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบ เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงของชั้นพื้นที่เหมาะสม และผลกระทบความคงทนของสภาพเปียกสลับแห้งระหว่างดินซีเมนต์และดินจิโอโพลิเมอร์

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลมหอบ ได้แก่ การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรง การทดสอบพิคคัตเตอร์เบอร์เกอร์ การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดไร้การโอบรัดของดินซีเมนต์ โดยการเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยมวลที่การบดอัดร้อยละ 95 ของค่าความหนาแน่นสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากการทดสอบด้วยวิธีการบดอัดแบบสูง

กว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) บดอัดลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 4 ชั้น และบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 27 และ 28 วัน

3.3 การทดสอบกำลังแรงอัดไว้การโอบรัดของดินจิโพลิเมอร์ โดยการเตรียมตัวอย่างดินจิโพลิเมอร์จากเถ้าที่ปริมาณเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 และ 20 โดยมวล และเถ้าที่ปริมาณเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 และ 20 โดยมวลที่ผสมเถ้าที่ปริมาณเถ้าแกลบร้อยละ 5 โดยมวล ที่การบดอัดร้อยละ 95 ของค่าความหนาแน่นสูงสุดจากการทดสอบด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายอัลคาไลน์ที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1:3 บดอัดลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 4 ชั้น จากนั้นบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 วัน แล้วบ่มที่ห้องอุณหภูมิห้องจนครบระยะเวลา 2, 7 และ 28 วัน โดยมีขอบเขตการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 1 โดยวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ดังแสดงรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 9

ตารางที่ 1 ขอบเขตของการเตรียมตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณ ซีเมนต์ โดยมวล (%)	ปริมาณ ความชื้น เหมาะสม ของน้ำ (%)	ปริมาณ ความชื้น เหมาะสมของ สารละลาย (%)	ปริมาณ เถ้าชาน อ้อยโดย มวล (%)	ปริมาณ เถ้าแกลบ โดยมวล (%)	อุณหภูมิใน การบ่ม (°C)	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)
SC5	5	OMC	-	-	-	อุณหภูมิห้อง	2,7 และ 28
BA10	-	-	OLC ¹	10	-	70*	2,7 และ 28
BA20	-	-	OLC ²	10	-		
BA10RH5	-	-	OLC ³	10	5		
BA20RH5	-	-	OLC ⁴	20	5		
BA10	-	-	OLC ¹	10	-	90*	2,7 และ 28
BA20	-	-	OLC ²	10	-		
BA10RH5	-	-	OLC ³	10	5		
BA20RH5	-	-	OLC ⁴	20	5		
BA10	-	-	OLC ¹	10	-	110*	2,7 และ 28
BA20	-	-	OLC ²	10	-		
BA10RH5	-	-	OLC ³	10	5		
BA20RH5	-	-	OLC ⁴	20	5		

หมายเหตุ * ในการบ่มอุณหภูมิในแต่ละตัวอย่างจะบ่มอุณหภูมิร้อน 1 วัน หลังจากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องจนครบระยะบ่มที่กำหนด $OMC = 7.80\%$, $OLC^1 = 12.80\%$, $OLC^2 = 14.00\%$, $OLC^3 = 16.20\%$, $OLC^4 = 18.40\%$, SC (Soil Cement) หมายถึง ดินลมหอบที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนตัวเลขกำกับไว้ด้วยหลังตัวอักษร เช่น SC5 คือใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 5 % ของมวลดินลมหอบ, BA (Bagasse Ash) หมายถึง เถ้าขานอ้อย ส่วนตัวเลขกำกับไว้ด้วยหลังตัวอักษร เช่น BA10 คือ ใช้เถ้าขานอ้อย 10 % ของมวลดินลมหอบ, BAxxRHx (Bagasse Ash and Rice Husk Ash) หมายถึง เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบ ส่วนตัวเลขกำกับไว้ด้วยหลังตัวอักษร เช่น BA10RH5 คือ ใช้เถ้าขานอ้อย 10 % ของมวลดินลมหอบ และเถ้าเถ้าขานอ้อย 5 % ของมวลดินลมหอบ 10 %, OMC (Optimum Moisture Content) หมายถึง ปริมาณความชื้นเหมาะสมของน้ำ และ OLC (Optimum Liquid Content) หมายถึง ปริมาณความชื้นเหมาะสมของสารละลาย



รูปที่ 1 ดินลมหอบขอนแก่น



รูปที่ 2 เถ้าขานอ้อย



รูปที่ 3 เถ้าแกลบ

รูปที่ 4 การบ่มตัวอย่างในถุงพลาสติก
หลังจากบ่มอุณหภูมิสูงรูปที่ 5 การแช่ตัวอย่างก่อนการ
ทดสอบ

รูปที่ 6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 7 เครื่องมือใช้ในการทดสอบ
ความหนาแน่นแห้ง

รูปที่ 8 แบบใช้ในการอัดตัวอย่าง



รูปที่ 9 ตู้บ่มในการบ่มอุณหภูมิ

3.4 การทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง (Wet-dry test) การทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้งจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D559 โดยทดสอบในส่วนผสมของตัวอย่างที่มีกำลังรับมวลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดเกิน 1724 กิโลพาสคัล (250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม.204/2556)

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบสมบัติดินพื้นฐานทางวิศวกรรม

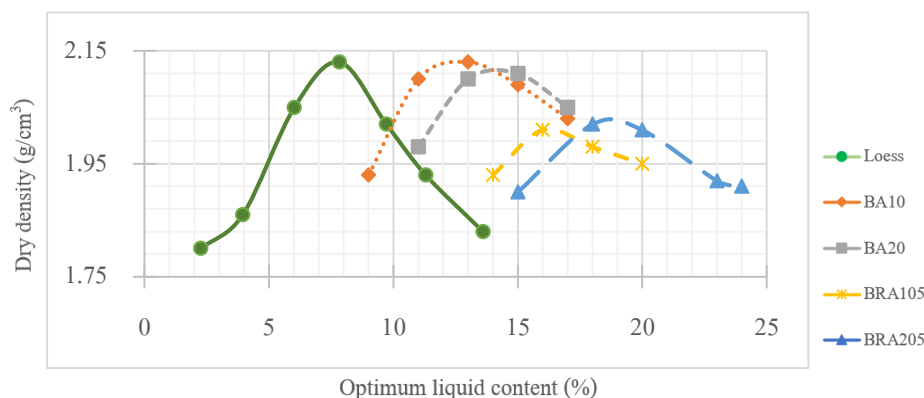
จากงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างดินลมหอบแบบถูกรบกวน (Disturbed) ที่ระดับความลึก 1.0 – 1.5 เมตรจากระดับผิวดินบริเวณหน้าศาลเจ้าพ่อมอดินแดง มหาวิทยาลัยขอนแก่น แล้วนำมาทดสอบสมบัติพื้นฐานและทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดิน ณ ห้องปฏิบัติการ จะได้ค่าสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลมหอบแสดงดังตารางที่ 2 และทางผู้วิจัยได้นำวัสดุซึ่งได้แก่ เถ้าชานอ้อยที่นำมาจาก อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น เถ้าแกลบนำมาจาก อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น และดินลมหอบไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence) ได้องค์ประกอบทางเคมีได้แสดงไว้ในดังตารางที่ 3 หลังจากนั้นได้ทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินจีโอโพลิเมอร์ในแต่ละสัดส่วนผสมซึ่งได้แก่ BA10, BA20, BA10RH5 และ BA20RH5 ตามลำดับ โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นแห้งได้ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินลมหอบ

สมบัติของดินทางวิศวกรรม	
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 4	100
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200	43.50
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.62
พิกัดเหลว (Liquid Limit), %	17.60
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit), %	NP
ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index), %	NP
Unified Soil Classification System (USCS)	SM
AASHTO Classification System	A-4
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) , g/cm ³	2.13
ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC), %	7.80

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF (X ray fluorescence)

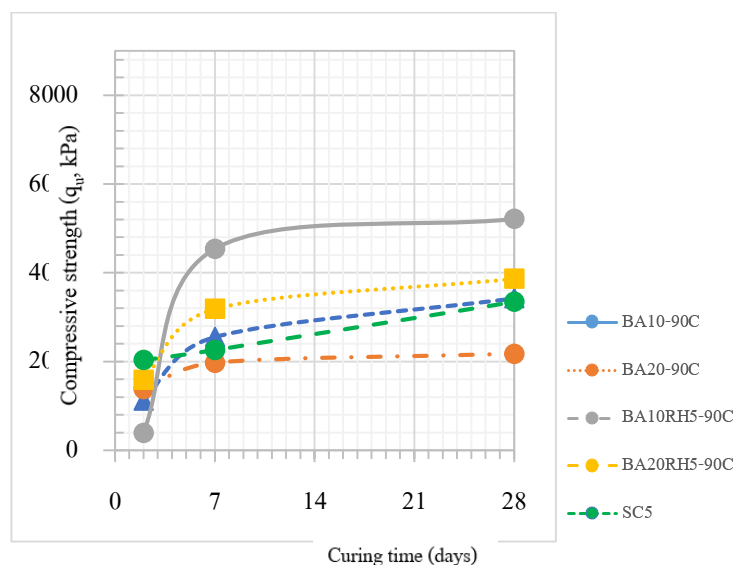
องค์ประกอบของทางเคมี	ปริมาณใน เถ้าชาน อ้อย (%)	ปริมาณใน เถ้าแกลบ (%)	ปริมาณใน ดินลมหอบ (%)
Al ₂ O ₃	1.26	0.26	14.48
SiO ₂	41.63	52.90	73.91
Fe ₂ O ₃	0.41	0.27	2.01
SO ₃	0.13	0.17	0.06
CaO	0.45	0.66	0.06



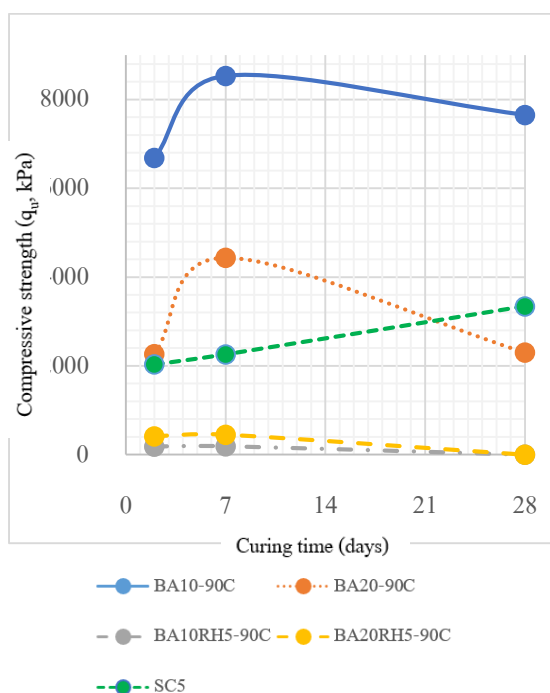
รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นแห้ง

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของดินจิโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส

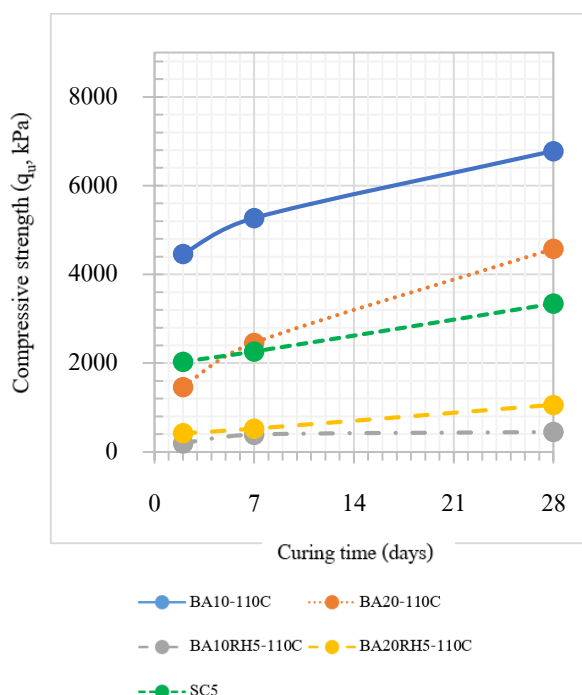
เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดของดินซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่ระยะบ่ม 7 วัน เทียบกับดินจิโพลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิ 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 11-13 ตามลำดับ นำมาทดสอบซึ่งผ่านมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ซึ่งมีค่าอย่างน้อย 1724 kPa จากรูปที่ 11 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของดินจิโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ดินซีเมนต์ร้อยละ 5 เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ส่วนดินจิโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนผสมมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดค่อนข้างมากดังรูปที่ 11 จะให้เห็นได้ว่าการบ่มอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ช่วยให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามระยะบ่มของทุกสัดส่วนผสม หากมีปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เพราะเถ้ามีความพรุนและบวมตัวในน้ำได้อย่างดี [3] ในขณะที่มีการผสมเถ้าแกลบก็ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดได้ดี ที่ระยะบ่ม 7 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของ BA10RH5 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า BA20RH5, BA10 และ BA20 ตามลำดับ รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของดินจิโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ระยะบ่ม 7 วัน จากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับสังเกตได้จากระยะบ่มที่ 28 วัน เมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ร้อยละ 5 จะมีการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดได้ดีซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดอายุในช่วงการบ่มที่ 27 และ 28 วันตามลำดับ ทั้งนี้สัดส่วนที่ผสมด้วยเถ้าแกลบ BA10RH5 และ BA20RH5 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ เพราะเถ้าแกลบมีลักษณะทางกายภาพเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และดูดซึมน้ำได้อย่างดีจึงทำให้เกิดการบวมตัวในน้ำ [6,7] และสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดดีที่สุดคือ BA10 และ BA20 ตามลำดับที่บ่มระยะที่ 7 วัน รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของดินจิโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยมีการพัฒนาค่ากำลังที่ 27 และ 28 ตามลำดับซึ่งมีความคล้ายคลึงกับดินซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่อายุบ่ม 7 วัน โดยสัดส่วนผสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดคือ BA10 และ BA20 ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่ากรณีที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ BRA105 และ BRA205 ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 90 และ 110 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้น้อยกว่าที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และกรณีที่สัดส่วนผสม BA10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า BA20 ทั้งที่มีสัดส่วนผสมและไม่มีสัดส่วนของเถ้าแกลบ ทั้งนี้แล้วสัดส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบผสมอยู่ด้วย จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่ 70 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีส่วนผสมเถ้าขานอ้อยได้อย่างเดียว ซึ่งที่อุณหภูมิ 90 และ 110 องศาเซลเซียส ไม่เหมาะสมที่จะใช้เถ้าแกลบผสม



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของดินจิโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของดินจิโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

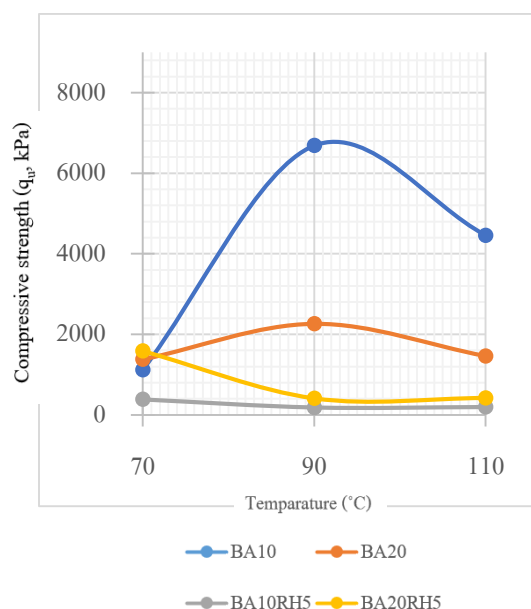


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของดินจิโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

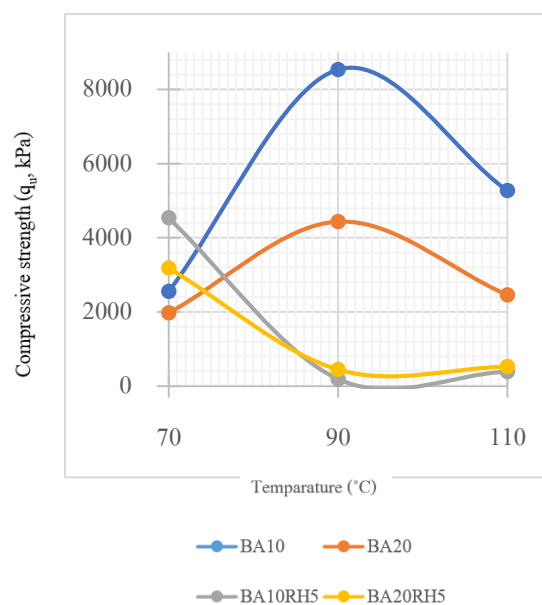
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิบ่มของดินจิโอโพลิเมอร์ในแต่ละระยะเวลาการบ่ม

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัดของดินที่ปรับปรุงด้วยจิโอโพลิเมอร์จากเถาขานอ้อย เถาขานอ้อยและเถาเกลบที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ บ่มตามระยะเวลาที่ 2 7 และ 28 วันตามลำดับ ที่ระยะ 7 วัน นำค่ากำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิใน

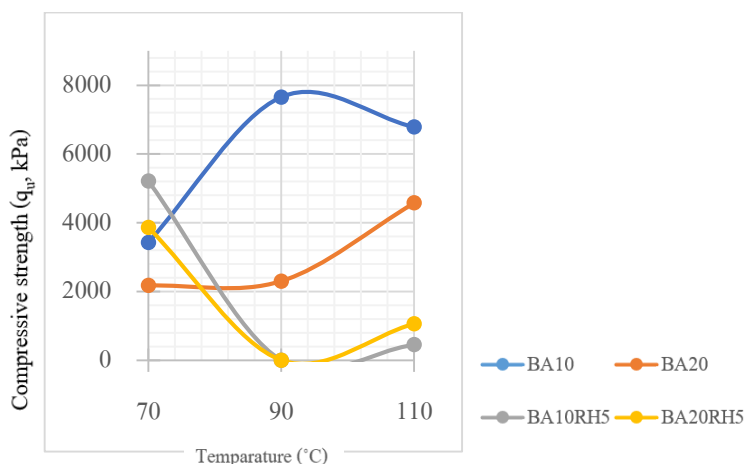
การบ่มมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดินที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์และอายุการบ่ม 2 วัน พบว่า สัดส่วนผสม BA10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้ดีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเป็นสัดส่วนผสม BA20 ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดรองลงมาจาก BA10 และสัดส่วนที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมซึ่งได้แก่ BA10RH5 และ BA20RH5 มีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำสุด เพราะเถ้าแกลบมีลักษณะทางกายภาพเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และดูดซึมน้ำได้อย่างดีจึงทำให้เกิดการบวมตัวในน้ำ [6-7] แสดงดังรูปที่ 14 ที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่าสัดส่วนผสม BA10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้ดีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเป็นสัดส่วนผสม BA20 ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดรองลงมาจาก BA10 และสัดส่วนที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมซึ่งได้แก่ BA10RH5 และ BA20RH5 มีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำสุด แสดงดังรูปที่ 15 อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าสัดส่วนผสม BA10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้ดีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเป็นสัดส่วนผสม BA20 ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดรองลงมาจาก BA10 และสัดส่วนที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมซึ่งได้แก่ BA10RH5 และ BA20RH5 มีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำสุด แสดงดังรูปที่ 16 ทั้งนี้การบ่มอุณหภูมิดังกล่าวจะเป็นการบ่มอุณหภูมิสูงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะเป็นการบ่มด้วยอุณหภูมิห้องตามระยะบ่มที่เหลือ โดยจากบ่มดินจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวที่ได้กำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดนั้นจะเป็นอุณหภูมิที่ 60-70 องศาเซลเซียส [3] สัดส่วนที่ใช้เถ้าขาน้อยอย่างเดียว BA10 และ BA20 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 90 และ 110 องศาเซลเซียส ในขณะที่สัดส่วนที่มีเถ้าขาน้อยและเถ้าแกลบผสมด้วยนั้นจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นก็มีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำสุด เพราะเถ้าแกลบมีลักษณะทางกายภาพเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และดูดซึมน้ำได้อย่างดีจึงทำให้เกิดการบวมตัวในน้ำ [6-7] ทั้งนี้ในการบ่มจีโอโพลิเมอร์ สามารถบ่มได้ที่อุณหภูมิห้องและในตู้อบอุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 85 องศาเซลเซียส [8] ความร้อนช่วยให้ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นได้ดี โดยสามารถให้ค่ารับกำลังแรงอัดในระยะเวลาอันสั้น โดยทั่วไปจะบ่มร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [9]



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิบ่มของดินจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 2 วัน



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิบ่มของดินจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิของดินจิโพลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

4.4 ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง

ในการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้งตามมาตรฐาน ASTM D559 โดยพิจารณาที่กำลังแรงอัดไม่มีการโอบรัดระหว่างดินจิโพลิเมอร์ในค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดนำมาทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง ทั้งนี้ได้ใช้วัสดุส่วน BA10 ที่อุณหภูมิการบ่ม 90 องศาเซลเซียส และวัสดุส่วน BA10RH5 ที่อุณหภูมิการบ่ม 110 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 17-18 ตามลำดับ เทียบกับดินซีเมนต์ร้อยละ 5 ดังรูปที่ 19 โดยอัดตัวอย่างทดสอบลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร ความสูง 11.88 เซนติเมตร ใช้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ใช้บ่มอายุที่ 7 วันทั้งหมด หลังจากนั้นเริ่มกระบวนการทดสอบ รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและผลกระทบกระบวนการเปียกสลับแห้งดินซีเมนต์ระหว่างไม่ชุดผิว (Without wet-dry test) และชุดผิว (With wet-dry test) พบว่าในการสูญเสียมวลของดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ชุดผิวนั้นมีแนวโน้มที่คงที่ ซึ่งแตกต่างจากการสูญเสียมวลของดินซีเมนต์ที่ชุดผิวที่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 11.06 รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและผลกระทบกระบวนการเปียกสลับแห้งดินจิโพลิเมอร์ BA10 ระหว่างไม่ชุดผิว (without wet-dry test) และชุดผิว (with wet-dry test) พบว่าในการสูญเสียมวลของดินจิโพลิเมอร์ที่ไม่ได้ชุดผิวนั้นมีการสูญเสียแนวโน้มที่คงที่และลดลง ซึ่งคล้ายกับสูญเสียน้ำหนักของดินจิโพลิเมอร์ที่ชุดผิว ซึ่งมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 4.57 รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและผลกระทบกระบวนการเปียกสลับแห้งดินจิโพลิเมอร์ BA10RH5 ระหว่างไม่ชุดผิว (without wet-dry test) และชุดผิว (with wet-dry test) พบว่าในการสูญเสียมวลของจิโพลิเมอร์ที่ไม่ได้ชุดผิวนั้นมีแนวโน้มที่คงที่และเพิ่มขึ้นในวัฏจักร 5-6 เพราะถ้าเกลบนั้น มีสมบัติดูดน้ำได้ดี [7] เมื่อนำไปแช่น้ำขณะทดสอบ ซึ่งคล้ายกับสูญเสียมวลของจิโพลิเมอร์ที่ชุดผิว โดยการอบอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นการอบอุณหภูมิตามมาตรฐาน [5] ทำให้น้ำในตัวอย่างไม่สามารถระเหยออกได้หมด [10] ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำหนักของตัวอย่างมีน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งตัวอย่างที่ชุดผิวและไม่ชุดผิว ซึ่งมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 9.05 รูปที่ 20 สภาพตัวอย่างดินจิโพลิเมอร์หลังจบกระบวนการ



รูปที่ 17 ดินจิโอโพลีเมอร์ BA10 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ใช้ในทดสอบความคงทนเปื่อยสลับแห้ง



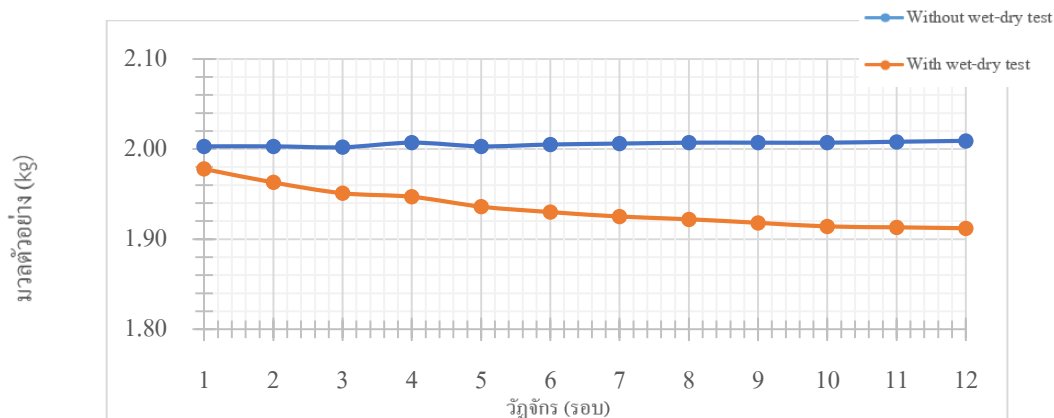
รูปที่ 18 ดินจิโอโพลีเมอร์ BA10RH5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ใช้ในทดสอบความคงทนเปื่อยสลับแห้ง



รูปที่ 19 ดินซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5 ของมวลดินที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ใช้ในทดสอบความคงทนเปื่อยสลับแห้ง

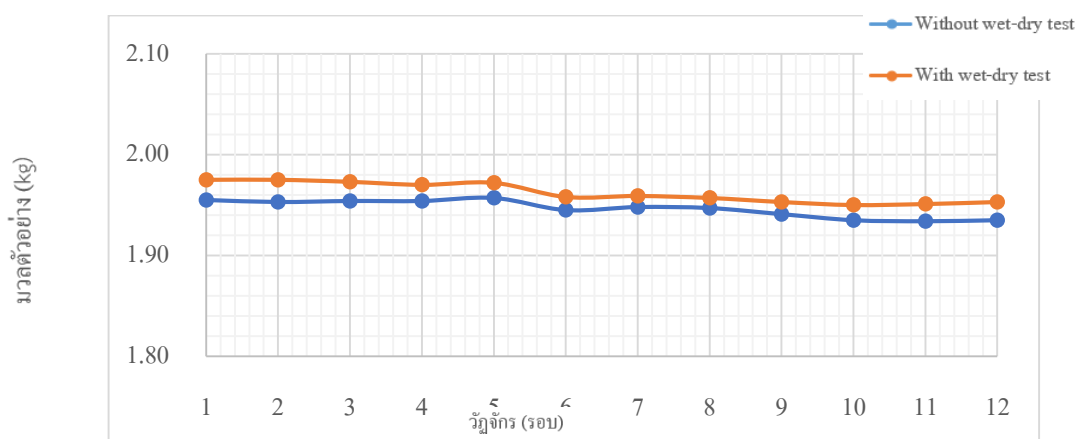


รูปที่ 20 สภาพผิวหน้าที่หลุดล่อนของดินจิโอโพลีเมอร์

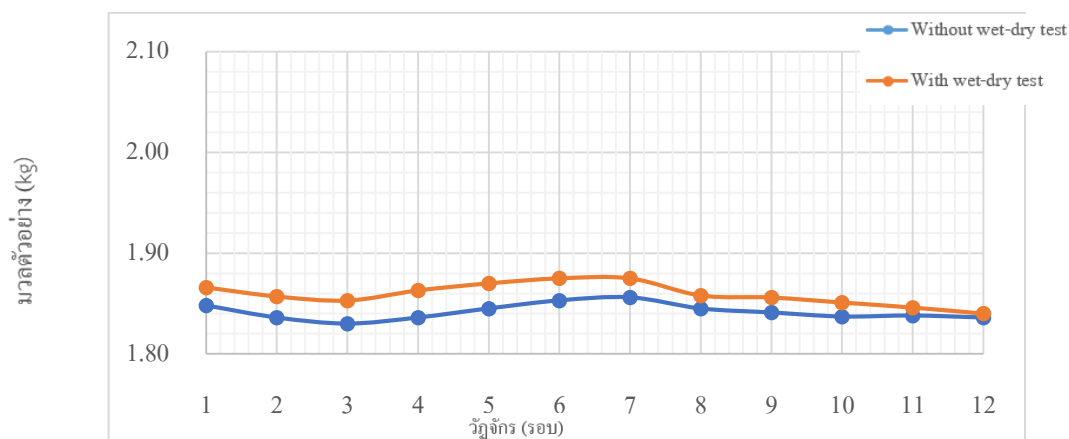


รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและวัฏจักรของผลกระทบกระบวนเปื่อยสลับแห้งดินซีเมนต์ ปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนัก ที่อายุบ่ม 7 วัน

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าดินซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 มีค่าร้อยละการสูญเสียมวลมากกว่าดินจิโอโพลีเมอร์ BA10RHA5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและดินจิโอโพลีเมอร์ BA10 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสตามลำดับ เหตุที่ดินจิโอโพลีเมอร์ทั้ง 2 ตัวอย่างดังกล่าวมีค่าร้อยละการสูญเสียที่น้อย เมื่อนำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสตามมาตรฐาน ASTM D559 การทำปฏิกิริยาของดินจิโอโพลีเมอร์จะให้พัฒนากำลังได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 70-90 องศาเซลเซียส [3] และกล่าวได้ว่า หากมีร้อยละการสูญเสียมวลตัวอย่างมากจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและวัฏจักรของผลกระทบกระบวนเปือกสลับแห้งดินจีโอโพลีเมอร์ BA10 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและวัฏจักรของผลกระทบกระบวนเปือกสลับแห้งดินจีโอโพลีเมอร์ BA10RH5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อายุบ่ม 7 วัน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความคงทนของดินซีเมนต์และดินจีโอโพลีเมอร์

ชื่อตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัด ที่ระยะบ่ม 7 วัน (kPa)	ร้อยละการสูญเสีย มวลตัวอย่าง (%)
ดินซีเมนต์ SC5	2033.08	11.06
ดินจีโอโพลีเมอร์ BA10 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	6687.88	4.57
ดินจีโอโพลีเมอร์ BA10RH5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	4459.70	9.05

5. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และดินจิโอโพลิเมอร์จากเถ้าขาน้อยและเถ้าแกลบ จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่มีการโอบรัด พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงจิโอโพลิเมอร์ มีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มและอุณหภูมิที่ให้การบ่มให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดเท่ากับ 7 วัน และ 90 องศาเซลเซียส ส่วนดินซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากนั้นเลือกส่วนผสมสำหรับนำไปทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้งที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐาน ASTM D559 โดยคำนึงถึงความพอเหมาะต่อการนำไปใช้งาน ในส่วนของดินซีเมนต์จะเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ที่ระยะบ่ม 7 บ่ม และเลือกดินจิโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วน BA10 และ BR10RH5 ส่วนผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้งพบว่าค่าร้อยละการสูญเสียมวลของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งและมีร้อยละการสูญเสียมวลเท่ากับ 11.06 ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียมวลของดินที่ปรับปรุงด้วยจิโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วน BA10 และ BR10RH5 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงต้นและลดลงในช่วงท้ายกระบวนการ เมื่อผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งและมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลเท่ากับ 4.57 และ 9.05 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการปรับปรุงดินด้วยจิโอโพลิเมอร์จากเถ้าขาน้อยสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่ากับดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ได้บางส่วนและทนต่อกระบวนการเปียกสลับแห้งได้มากกว่าดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและคณาจารย์แผนกวิศวกรรมปฐพี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การอนุเคราะห์สถานที่ใช้ในงานวิจัยและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ และขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนอุดหนุนในงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสุเชษฐ์ เอี่ยมเชย. ความคงทนของดินซีเมนต์. กรุงเทพฯ: กองวิเคราะห์และวิจัย, กรมทางหลวง, 2532, 134.
- [2] กระทรวงอุตสาหกรรม. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ. มอก. 15 เล่ม 1-2555. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2555.
- [3] อุบลลักษ์ณ์ รัตนศักดิ์. วัสดุจิโอโพลิเมอร์ (Geopolymer). กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2560.
- [4] มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม
- [5] ASTM Standard D559. Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [6] ปริญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2555.
- [7] อุบลลักษ์ณ์ รัตนศักดิ์, ปริญา จินดาประเสริฐ. เถ้าแกลบในงานคอนกรีต. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ไอซ์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง, 2552.
- [8] ปริญา จินดาประเสริฐ. เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2548.
- [9] Chindaprasit P, Rattanasak U, Taebuanhuad S. Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Materials and Structure*. 2013, 46 (3), 375-381.
- [10] Biswal, D.R., Sahoo, U.C., and Dash, S.R. (2019). Durability and shrinkage studies of cement stabilized granular lateritic soils. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(12), 1451-62.

