สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเถ้าแกลบกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

พานิช วุฒิพฤกษ์[1] วิไลลักษณ์ สระมูล[2] ชัยรัตน์ ธีระวัฒนะสุข[3] และ อิทธิพล มีผล[4*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาวและแกลบที่กระตุ้นกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ สมบัติทางวิศวกรรมที่ศึกษาประกอบด้วยความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ความแข็งแรงดึงแยก มอดุลัสยืดหยุ่น ความแข็งหลังกระบวนการบ่มแห้งและบ่มเปียก และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยนำจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบที่ให้ความแข็งแรงสูงที่สุดซึ่งประกอบด้วยดินขาวต่อเถ้าแกลบ 70:30 กระตุ้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์ จากนั้นนำมาปรับปรุงดินเหนียวในอัตราส่วนดินเหนียวต่อจีโอโพลิเมอร์โดยน้ำหนักได้แก่ 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือดินเหนียวต่อจีโอโพลิเมอร์ 70:30 ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (q_u) ที่อายุการบ่ม 7 วัน สูงที่สุดภายใต้อุณหภูมิการบ่ม 70°C และ 50°C เท่ากับ 9,352 และ 4,557 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ และความแข็งแรงดึงแยกสูงที่สุดภายใต้อุณหภูมิการบ่ม 70°C และ 50°C เท่ากับ 1,182 และ 576 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของการเสียรูปที่ความแข็งแรงร้อยละ 50, E_{50} และความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดแสดงดังสมการ E_{50} (kN/m^2) = 2.967q_u+15161 จากผลทดสอบแห้งและเปียกแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วน C:GP 70:30 มีค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุดเท่ากับ 2,445.89, 1,670.55, และ 1,218.68 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร โดยมีรอบการบ่ม 3, 9, และ 12 รอบ สอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักซึ่งมีค่าต่ำที่สุด โดยในรอบที่ 1 ถึง 12 สูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 1.5 ถึง 7.2 ผลการศึกษานี้มีประโยชน์ในการนำมาวัสดุทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ แต่ยังคงมีปัญหาด้านราคาเนื่องจากสารเคมีที่นำมาใช้ปรับปรุงมีราคาสูงกว่าปูนซีเมนต์ในภาพรวม

คำสำคัญ: ดินเหนียว; จีโอโพลิเมอร์ดินขาว; เถ้าแกลบ; สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

รับพิจารณา: 12 พฤศจิกายน 2564
แก้ไข: 19 พฤศจิกายน 2564
ตอบรับ: 8 ธันวาคม 2564

---

[1] ศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

[3] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อมล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +668 9184 8688 อีเมล: ittipon.m@fte.kmutnb.ac.th

Technical Education Journal : King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Vol. 12 No. 3 September - December 2021

Engineering Properties of Engineering Properties of Clay Treated by Kaolin-Rice Husk Ash Geopolymer which Activated with Sodium Hydroxide Solution

Panich Voottipruex[1] Wilailak Sramoon[2] Chairat Teerawattanasuk[3] and Ittipon Meepon[4*]

Abstract

This research aims to study engineering properties of clay treated by kaolin-rice husk ash geopolymer which activated with sodium hydroxide solution. The engineering properties studied consisted of unconfined compressive strength, split tensile strength, modulus of elasticity, strength after wet and dry processes and permeability coefficient. The highest compressive strength of kaolin-rice husk ash geopolymer was obtained from kaolin: rice husk ash of 70:30 stimulated by sodium hydroxide solution of 8 molars. Clay (C) was treated by geopolymer (GP) with various ratio of C:GP by weight of 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50. The results showed that the optimal C:GP ratios of geopolymer treated clay was 70:30, which yielded the highest unconfined compressive strength at 7 days under curing temperatures of 70°C and 50°C, were 9,352 and 4,557 kN/m², respectively. While the highest split tensile strength under curing temperatures of 70°C and 50°C was 1,182 and 576 kN/m^2, respectively. The relationship between modulus of deformation at 50% strength, E_{50} and unconfined compressive strength, q_u is expressed as E_{50} (kN/m^2) = 2.967q_u+15161. After wet and dry processes, the samples with the C:GP 70:30 ratio exhibited highest the strengths of 2,445.89, 1,670.55, and 1,218.68 kN/m^2 after 3, 9, and 12 cycles corresponded to the lowest weight loss. The weight loss of C:GP 70:30 in cycles 1 to 12 was in the range of 1.5 to 7.2%. This GP can be considered as an alternative material to replace cement. However, at present time price is a concerned matter because the chemicals used for the improvement are higher than the cement as a whole.

Keywords: clay; geopolymer; kaolin; rice husk ash; sodium hydroxide

Received: November 12, 2021
Revised: November 19, 2021
Accepted: December 8, 2021

---

[1] Professor, Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineer and Technology, Mahanakorn University of Technology
[3] Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
[4] Assistant Professor, Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
[*] Corresponding Author, Tel. +668 9184 8688 e-mail: ittipon.m@fte.kmutnb.ac.th

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุที่เหมาะสมต่อการก่อสร้างคันทางในบางพื้นที่หาได้ยากมีราคาแพง โดยเฉพาะชั้นรองพื้นทาง จึงนิยมปรับปรุงวัสดุที่หาได้ง่ายทั่วไปดังเช่นดินเหนียวได้ถูกนำมาปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมสูงขึ้นเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ในอดีตที่ผ่านมาสารผสมเพิ่มที่นิยมนำมาปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้เหมาะสมต่อการก่อสร้างคันทางคือปูนซีเมนต์ แต่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ได้จากการบุกเบิกจากแหล่งธรรมชาติและในกระบวนการผลิตต้องใช้พลังงานจำนวนมาก การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนประมาณ 5-8% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก คาดว่าการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ตันออกสู่ชั้นบรรยากาศ [1] ทำให้เกิดการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ในการก่อสร้างคันทาง ในอดีตมีการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเผาถ่านหินได้รับความนิยมเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยนำมาใช้ในงานคอนกรีตและเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน ทำให้ความต้องการใช้เถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้นและมีราคาสูง จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาวัสดุเหลือใช้ประเภทอื่นที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน อาทิ เถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพดินโดยตรง แกลบเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงสีข้าวที่มีอยู่มากมายในประเทศไทย มีการนำแกลบดิบมาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรม เช่น นำมาผสมเพื่อผลิตอิฐมอญ ต่อมามีผู้นำแกลบดิบมาเผาแล้วนำมาบดผสมลงในคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัสดุดังกล่าวช่วยลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตและช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็พบว่าสมบัติของดินที่ปรับปรุงยังไม่ดีเท่าการปรับปรุงด้วยเถ้าลอย จึงจำเป็นต้องหาแนวทางอื่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินให้สามารถรับแรงแบกทานได้สูงขึ้นที่ดีกว่าหรือเทียบเท่าการใช้ซีเมนต์หรือเถ้าลอย

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุประสานเกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของธาตุที่อยู่ในรูปอสันฐาน (Amorphous) ซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ [2], [3] โดยจะถูกทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารอัลคาไลน์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น ซึ่งจะใช้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการแข็งตัวได้เร็วขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส แต่ในอุณหภูมิปกติจีโอโพลิเมอร์ก็สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้อย่างช้าๆ วัสดุตั้งต้นที่นิยมนำมาใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์มัก ได้แก่ เถ้าลอย [4] และดินขาวเผา [5] อย่างไรก็ตาม ดินขาวดิบ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน [6] และเถ้าแกลบ [7] ก็สามารถนำมาใช้ได้ ประเทศไทยเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตรที่มีวัสดุเหลือใช้ที่เกิดจากผลิตผลทางการเกษตรในปริมาณมาก เช่น เถ้าแกลบ (Rice husk ash) [7], [8] เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) และเถ้าปาล์มน้ำมัน (Oil palm ash) เถ้าเหล่านี้เป็นผลพลอยได้จากการเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ในแต่ละวันมีปริมาณเถ้าจากวัสดุเหล่านั้นเป็นจำนวนมากแต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมาก กลายเป็นของเสียที่จะต้องกำจัดและส่งปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา จีโอโพลีเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวัสดุเชื่อมประสานทางเลือกสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานผิวทางและการปรับปรุงคุณภาพของดิน [9] - [14] การปรับเสถียรภาพดินลูกรังคุณภาพต่ำโดยใช้ซีเมนต์และจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอย (FA) ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์เหลว การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าดินที่ปรับเสถียรภาพมีโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า California Bearing Ratio (CBR) ที่เพิ่มขึ้น ซีเมนต์และจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอย (FA) สามารถนำมาใช้เป็นสารปรับเสถียรภาพสำหรับวัสดุรองพื้นทางที่ประสบความสำเร็จ [15] ในประเทศไทย เถ้าชานอ้อย (BA) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมถูกใช้เป็นสารตั้งต้นหลัก ในขณะที่เถ้าลอย (FA) ถูกใช้เป็นส่วนเสริมในการพัฒนาจีโอโพลีเมอร์ ผลจากการวิจัยนี้จะส่งเสริมให้จีโอโพลีเมอร์ BA–FA เป็นสารยึดเกาะที่สะอาดขึ้นโดยใช้วัสดุเหลือใช้ รีไซเคิลในการปรับปรุงพื้นดิน [6]

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ และวัสดุประสานอื่น เป็นการลดต้นทุนและใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบ ศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบ ความเข้มข้มของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความแข็งแรงอัด

ของจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบ โดยแปรผันอัตราส่วนระหว่างดินขาวกับเถ้าแกลบ 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 โดยน้ำหนักของดินขาว และใช้ความละเอียดของเถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กำหนดไว้ที่ช่วง 4 ถึง 12 โมลาร์ โดยใช้เท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบ Compaction Test ในการบดอัดตัวอย่างดินขาวเถ้าแกลบในสัดส่วนต่างๆ ตัวอย่างจะถูกนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C 70°C และ 90°C นำตัวอย่างมาอัดในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูง 1:2 บ่มเป็นระยะเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน เมื่อได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีสูตรเหมาะสมแล้ว จึงนำมาปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวให้มีความแข็งแรงอัดที่เหมาะสมใช้ทดแทนวัสดุงานทางคุณภาพดีด้วยต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตทางอุตสาหกรรมเกษตรไปสร้างมูลค่าในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดการใช้พลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยสารพอซโซลานตั้งต้นที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอลูมินาที่สามารถชะละลายได้ง่าย วัสดุพอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจากสองแหล่งได้แก่ พอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial pozzolan) และพอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural pozzolan) พอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิตได้แก่เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า หรือเถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบซึ่งได้จากการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง [16] ปัจจุบันมีการนำเอาพอซโซลานจำพวกนี้ไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น เขื่อนและสะพาน เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ การนำวัสดุพอซโซลานธรรมชาติซึ่งได้แก่ ดินขาว เถ้าภูเขาไฟ เพอร์ไรท์ อาจต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อน เช่น การเผา การทำให้แห้ง การบดให้ละเอียด เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้วัสดุพอซโซลานตั้งต้นคือดินขาวดิบจากจังหวัดลำปาง และเถ้าแกลบจากจังหวัดสุพรรณบุรี

2.1 ดินขาว

ดินขาวหรือคาโอลิไนท์ (Kaolin) คือดินที่มีสีขาวเป็นแร่ตามธรรมชาติที่เกิดจากการผุผังและการสลายตัว ทางเคมีของหินบางชนิด ประกอบด้วยแร่ดินในกลุ่มแร่คาโอลิไนท์ (Kaolinite group) เป็นส่วนสำคัญ เมื่อบริสุทธิ์จะมีสีขาวแต่อาจมีสีอื่นเมื่อมีมลทิน เช่น ถ้าเกิดปนกับเหล็กออกไซด์ตามขั้นตอนต่าง ๆ ของการออกซิเดชั่น (Oxidation)

ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตดินขาวได้สำหรับเซรามิกจนถึงระดับเป็นสารตัวเติมคุณภาพกลางเท่านั้น โดยส่วนใหญ่เป็นดินขาวจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการผุผังตามธรรมชาติของหินต่างๆ จึงมักมีเม็ดหยาบมีความเหนียวน้อยกว่าดินเม็ดละเอียด แหล่งดินขาวในประเทศไทยมีหลายแห่ง เช่น ที่จังหวัดระนอง ลำปาง ปราจีนบุรี นราธิวาส อุตรดิตถ์ เชียงราย และชุมพร ดินขาวที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้จากแหล่งผลิตเซรามิคจังหวัดลำปาง มีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) 2.62 มีค่าขีดจำกัดเหลวร้อยละ 33.0 ขีดจำกัดพลาสติกร้อยละ 22.78 ดัชนีพลาสติกร้อยละ 10.22 และค่าขีดจำกัดหดตัวร้อยละ 12.33 จากการจำแนกดินด้วยวิธีของ AASHTO ดินขาวที่ศึกษาจัดอยู่ในกลุ่ม A-7-6 มีลักษณะเป็นดินเหนียวละเอียด จากการจำแนกดินด้วยระบบเอกภาพจัดเป็นดินเหนียวอนินทรีย์ที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH)

2.2 เถ้าแกลบ (RHA)

เถ้าแกลบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้จากโรงสีข้าวในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย จากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการสีข้าวซึ่งมีอุณหภูมิการเผาประมาณ 600°C มีค่าความถ่วงจำเพาะ(G_s) ประมาณ 2.10 ไม่มีค่าขีดจำกัดเหลว ไม่มีขีดจำกัดพลาสติก และไม่มีดัชนีพลาสติก แต่มีค่าขีดจำกัดหดตัวร้อยละ 58.64 ก่อนทดสอบนำเถ้าแกลบมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จากการศึกษาองค์ประกอบประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบพบว่ามีผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 90 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 0.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 3.7

2.3 ดินเหนียว

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (C) ได้จากจังหวัดปทุมธานี เก็บที่ระดับความลึก 4 ถึง 6 เมตร จากระดับผิวดิน มีปริมาณน้ำธรรมชาติร้อยละ 79.8 หน่วยน้ำหนักเปียก 15.62 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.781 ขีดจำกัดเหลวร้อยละ 51.13 ขีดจำกัดพลาสติกร้อยละ 28.94 ดัชนีพลาสติกร้อยละ 22.19 และค่าขีดจำกัดหดตัวร้อยละ 7.41 จากการจำแนกดินด้วยวิธีของ AASHTO (AASHTO, 2012) ดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษาจัดอยู่ในกลุ่ม A-7-5 มีลักษณะเป็นดินเหนียวละเอียด มีขีดจำกัดเหลวมาก จากการจำแนกดินด้วยระบบเอกภาพจัดเป็นดินเหนียวอนินทรีย์ที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH)

2.4 สารละลายอัลคาไลน์กระตุ้นปฏิกิริยา

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็นด่างสูง แต่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลวหมายถึงสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวข้นไม่มีสี และโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็งหมายถึงโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือมีสีขาว การศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เนื่องจากหาได้ง่าย เตรียมโดยใช้ NaOH ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเกล็ดชนิดเกรดการค้า ละลายกับน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายให้มีค่า 8 โมลาร์ ทำได้โดยการละลาย NaOH จำนวน 320 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

3. วิธีการการทดสอบ

3.1 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม

การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมอ้างอิงมาตรฐาน ASTM ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	อุปกรณ์ เครื่องมือและวิธีการทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ
1	Hydrometer Analysis Test	ASTM D4221-99
2	Specific Gravity of Soil	ASTM D854
3	Atterberg's Limits of Soil	ASTM D4318
4	Modified Compaction Test	ASTM D1557
5	Permeability Test	ASTM D2434
6	Unconfined Compression Test	ASTM D2166
7	Wetting and drying cycle Test	ASTM D559
9	Splitting Tensile Test	ASTM D3967

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างดินเหนียวและดินขาวมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 สำหรับเถ้าแกลบนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยการร่อนผ่านน้ำแล้วนำมาผึ่งแห้งก่อนนำมาใช้ในการทดลอง ในการศึกษาใช้สัดส่วนดินขาว (KA) เถ้าแกลบ (RA) ประกอบด้วย KA:RA 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 สำหรับการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ให้นำตัวอย่างดินขาว (KA) ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์ด้วยปริมาณความชื้นเหมาะที่สุดที่ได้จากการทดสอบ Modified Compaction Test ที่ ร้อยละ 18.3 โดยน้ำหนักดินขาวแห้ง ในเวลาเดียวกันนำตัวอย่างเถ้าแกลบผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์ด้วยปริมาณความชื้นเหมาะที่สุดร้อยละ 60 ของน้ำหนักเถ้าแกลบแห้ง จากนั้นนำส่วนผสมของดินขาวและเถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮ ดรอกไซด์มาผสมรวมกันแล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อปรับอุณหภูมิให้ลดต่ำลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง เนื่องจากขณะกวนส่วนผสมสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชั่นสังเกตได้จากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น จากนั้นนำส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ดินเหนียว-เถ้าแกลบใส่ลงในแบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร ถอดแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วนำแผ่นพลาสติกใสมาหุ้มตัวอย่างเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น นำตัวอย่างเข้าตู้อบโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25, 50, 70 และ 100 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะมีระยะเวลาการบ่ม 7, 14, และ 28 วัน

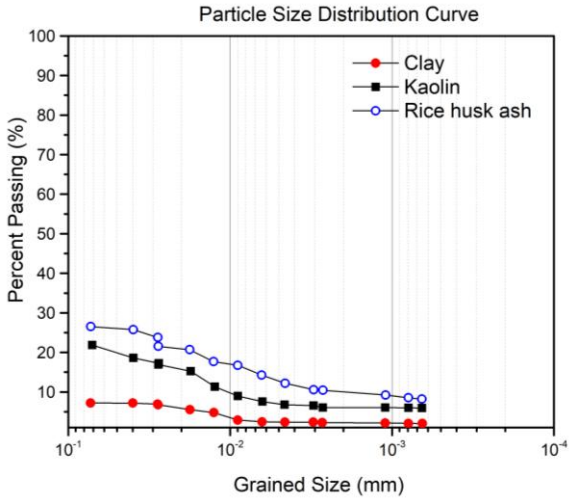
3.3 ปรับปรุงตัวอย่างดินเหนียวด้วยจีโอโพลีเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบ (GP)

เมื่อได้จีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถาแกลบที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่ดีที่สุดจากข้อ 3.2 แล้วจึงนำดินเหนียวมาผสมกับจีโอโพลิเมอร์ที่ได้ในสัดส่วนระหว่างดินเหนียว (C) ต่อจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบ (GP) ดังนี้ C:GP 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 โดยนำมาบ่มภายใต้อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะมีระยะเวลาการบ่ม 7, 14, และ 28 วัน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะและการกระจายขนาดด้วยไฮดรอมิเตอร์

ดินเหนียวมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.78 ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับร้อยละ 6.88 ดินขาวมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับร้อยละ 22.28 เถ้าแกลบมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.24 ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับร้อยละ 23.65 จากการวิเคราะห์ขนาดด้วยไฮโดรมิเตอร์ ผลแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายขนาดเม็ดดินเหนียว ดินขาว และเถ้าแกลบ

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

นำตัวอย่างที่ใช้ศึกษามาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ โดยสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างดินเหนียว ดินขาว และเถ้าแกลบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว ดินขาว และเถ้าแกลบ

สารประกอบ	ดินเหนียว (%)	ดินขาว (%)	เถ้าแกลบ (%)
SiO_2	58.12	66.15	89.16
Al_2O_3	13.95	22.01	0.43
Fe_2O_3	6.78	0.81	2.68
CaO	1.42	0.13	0.51
K_2O	2.36	4.34	2.12
Na_2O	0.97	0.42	0.13
MgO	1.87	0.53	0.25
SO_3	2.46	NA	0.13
TiO_2	1.01	0.02	NA
LOI	10.58	4.86	3.75

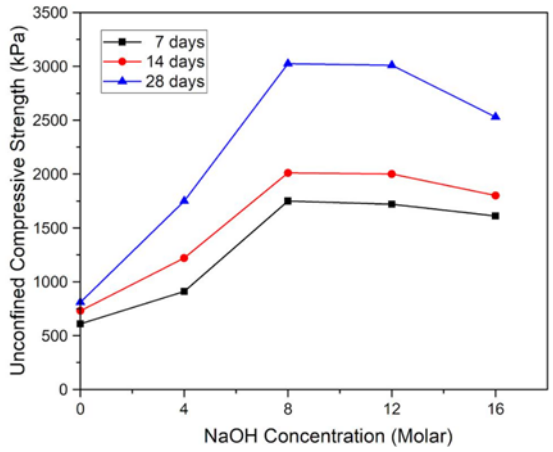
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

4.3.1 จากการทดสอบการบดอัด (Modified Compaction Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียว ดินขาว และขี้เถ้าแกลบ ผลการบดอัดแบบมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งค่าปริมาณน้ำสูงสุดที่ได้จะนำมาใช้เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบสัดส่วนดินขาวและเถ้าแกลบเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสม จากนั้นนำสัดส่วนวัสดุที่ได้มาผสมกับดินเหนียว โดยปริมาณน้ำเหมาะสมที่ใช้สำหรับตัวอย่างดินเหนียวเท่ากับร้อยละ 19.7 ของน้ำหนักดินแห้ง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

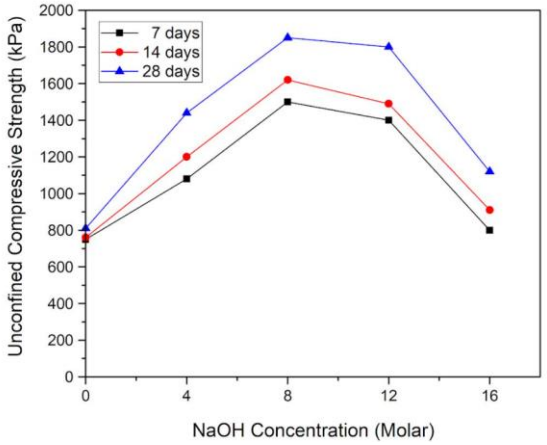
ผลการทดสอบ	ดินเหนียว	ดินขาว	เถ้าแกลบ
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กิโลนิวตัน/ตร.ม.)	15.21	16.28	10.89
ความชื้น (%)	19.7	18.3	60

4.3.2 นำตัวอย่างดินขาวมาผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นของสารละลาย NaOH แปรผันจาก 4 ถึง 16 โมลาร์ นำตัวอย่างหุ้มด้วยพลาสติกบ่มที่อุณหภูมิห้อง ผลทดสอบแสดงว่าสารละลายความเข้มข้น 8 โมลาร์ ให้ความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุดเท่ากับ 1,750, 2,010 และ 3,025 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจาก ความความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่น้อยเกินไปทำให้การชะละลายซิลิก้า และอลูมิน่า ทำได้ไม่ดี ในทางกลับกันหากความความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มากเกินไป จนทำปฏิกิริยาไม่หมด จะทำให้โครงสร้างผลึกไม่แข็งแรง



รูปที่ 2 ความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินขาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิห้อง

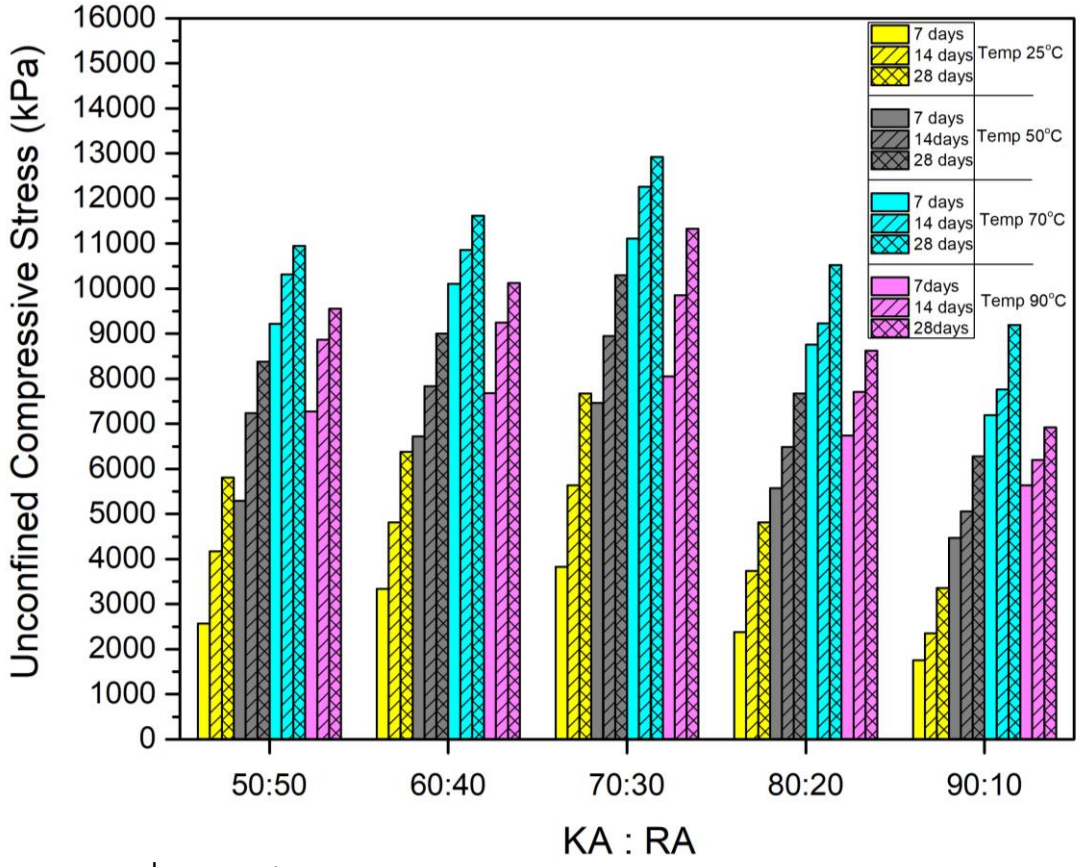
ในทำนองเดียวกันจากผลการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูง (q_u) ของเถ้าแกลบและโซเดียมไฮดรอกไซด์ บ่มที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดีที่สุดเท่ากับ 8 โมลาร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน โดยมีค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด 1,500 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ที่อายุบ่ม 14 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด 1,620 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด 1,850 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของเถ้าแกลบและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิห้อง

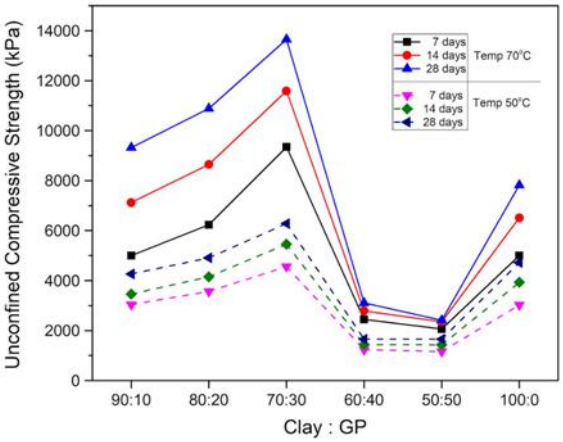
4.3.3 นำตัวอย่างที่เตรียมได้ตามหัวข้อ 3.2 มาบ่มที่อุณหภูมิ 25, 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7, 14, และ 28 จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของจีโอโพลิเมอร์ดินขาว:เถ้าแกลบเท่ากับ 70 : 30 ให้ค่าแข็งแรงสูงสุดทุกอุณหภูมิการบ่ม โดยมีค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มจนถึง 70°C ตัวอย่างมีค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 11,107, 12,259 และ 12,919 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากดินขาว มีความไวในการทำปฏิกิริยา เร็วกว่าในเถ้าแกลบ อย่างไรก็ตามหากนำไปประยุกต์ในงานถนนซึ่งอุณหภูมิผิวทางสูงที่สุดที่เป็นไปได้คือ 50°C ซึ่งพบว่ามีค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่จำกัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 7,468, 8,947 และ 10,292 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับ 90°C ค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการบ่ม 70°C โดยมีค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 8, 049, 9, 854 และ 11, 331 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ ลดลงคิดเป็นร้อยละ 27.5, 19.6, และ 12.3 เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้แรงยึดเกาะจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ถูกทำลายลง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบ (KA:RA)

4.3.4 เมื่อได้จีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบที่เหมาะสม ต่อไปนี้จะเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งมีสัดส่วนดินขาวต่อเถ้าแกลบ 70:30 กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์ นำมาใช้ปรับปรุงดินเหนียวอ่อนในสัดส่วนดินเหนียว:จีโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ในสัดส่วนดินเหนียว:จีโอโพลิเมอร์ 70:30 ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดในทุกอายุการบ่ม ที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 9,352.43 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม โดยมีค่าที่อายุการบ่ม 14, 28 วัน เท่ากับ 11,589.76, 13,652.22 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ แสดงว่าอายุการบ่มส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นเกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



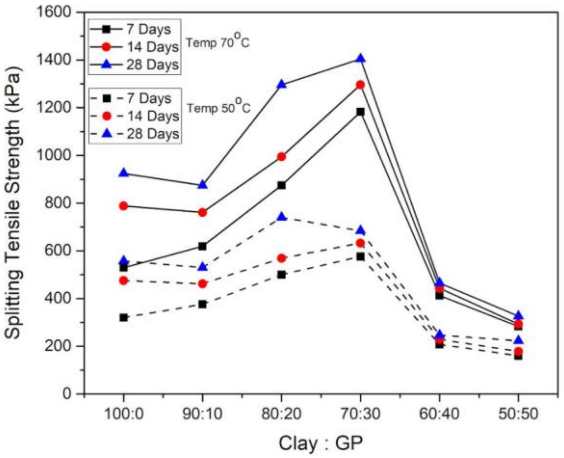
รูปที่ 5 ความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์

เพื่อให้อุณหภูมิการบ่มใกล้เคียงกับสภาพการใช้งาน จึงได้ปรับปรุงดินเหนียวด้วยจีโอโพลิเมอร์ในสัดส่วนดินเหนียว:จีโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 50°C พบว่าสัดส่วน C:GP 70:30 ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ

4,557, 5,449 และ 6,280 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ถึงแม้ว่าจะมีค่าความแข็งแรงต่ำว่าตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 70°C แต่ยังสูงกว่าค่าตามมาตรฐาน ทล.-ท.105/2515 [17] ซึ่งเป็นมาตรฐานเทียบเคียง ASTM D2166 กำหนดค่าแข็งแรงอัดไม่ถูกจำกัดที่อายุ 7 วัน ทดสอบโดยนำตัวอย่างแช่น้ำนาน 24 ชั่วโมงนำมาเช็ดผิวแห้งต้องมีค่าความแข็งแรงไม่ต่ำกว่า1,750 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลา 7 วัน สูงกว่า 2.60 เท่า แสดงว่าดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์อัตราส่วน 70:30 สามารถนำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้ ดังแสดงในรูปที่ 5

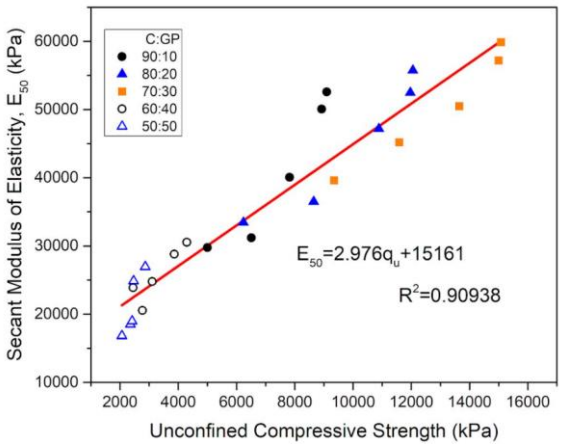
4.3.5 ความแข็งแรงดึงแยก (Splitting Tensile Strength, ASTM D3967) [18] เป็นการนำตัวอย่างดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ในสัดส่วนดินเหนียว:จีโอโพลิเมอร์ เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 บ่มที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28 วัน นำมาทดสอบแรงดึงแยก ผลทดสอบพบว่าตัวอย่าง C:GP 70:30 แสดงค่าความแข็งแรงดึงแยกสูงสุดภายใต้อุณหภูมิการบ่ม 50°C และ 70°C สำหรับตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าความแข็งแรงดึงแยกเท่ากับ 576, 632, และ 740 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ส่วนตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 70°C มีค่าความแข็งแรงดึงแยกเท่ากับ 1,182, 1,296, และ 1,404 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าความแข็งแรงดึงแยกของตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันซึ่งเท่ากับ 529.58 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เกินเกณฑ์ที่กำหนดร้อยละ 5 ดังแสดงในรูปที่ 6

4.3.6 มอดุลัสยืดหยุ่น โดยรูปที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของการเสียรูปที่ความแข็งแรงร้อยละ 50, E_{50} และความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ของตัวอย่างดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบ ซึ่งสามารถทำนายค่า E_{50} ได้ดังสมการที่ 1 และมีขอบเขตค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดในช่วง 2,000 ถึง 15,000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 6 ความแข็งแรงดึงแยกของตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C

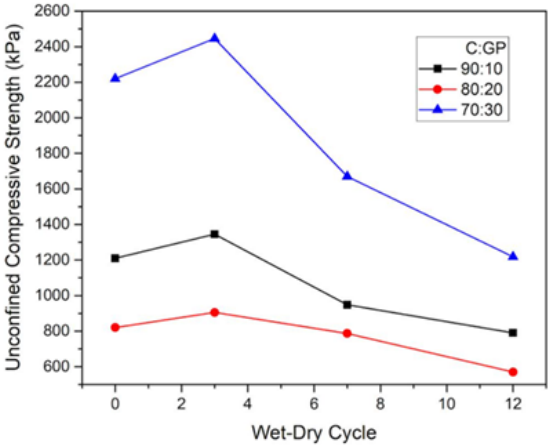
$$E_{50} = 2.976q_u + 15161 \quad (1)$$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u สำหรับดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบ

4.3.7 การทดสอบกระบวนการแห้งและเปียก โดยเมื่อพิจารณาด้านความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดจากตัวอย่างในการทดสอบกระบวนการแห้งและเปียกปรากฏว่าตัวอย่าง C:GP 60:40 และ 50:50 ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้ภายหลังผ่านกระบวนการแห้งและเปียกในรอบที่สามเท่านั้น สาเหตุเป็นเพราะการเชื่อมประสานไม่หนาแน่นเป็นเหตุให้น้ำเข้าทำลายโครงสร้างดิน สำหรับตัวอย่างที่ยังคงสภาพอยู่ได้เมื่อผ่านสภาวะแห้งเปียก 12 รอบคือตัวอย่าง C:GP 70:30; 80:20 และ 90:10 แต่

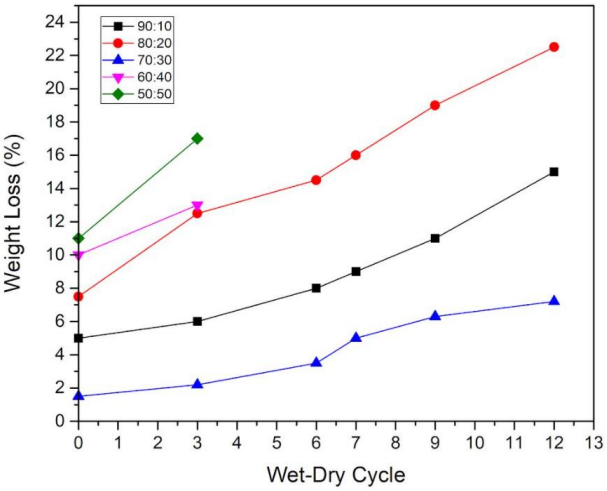
ตัวอย่างที่ยังคงสภาพดีที่สุดและให้ค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดสูงที่สุดคือ C:GP 70:30 เนื่องจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นสมบูรณ์ที่สุดเกิดการเชื่อมประสานที่แน่นหนา เช่นเดียวกับ C:GP 80:20 และ 90:10 แต่เนื่องจากปริมาณดินเหนียวมีมากเกินไปทำให้การทำปฏิกริยาจีโอโพลิเมอร์เกิดไม่ทั่วถึง ยังคงมีดินเหนียวบางส่วนหลงเหลืออยู่ซึ่งหลุดออกเมื่อผ่านกระบวนการแห้งเปียกทำให้ค่าแข็งแรงลดลง



รูปที่ 8 ความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดและรอบการทดสอบแห้งและเปียก

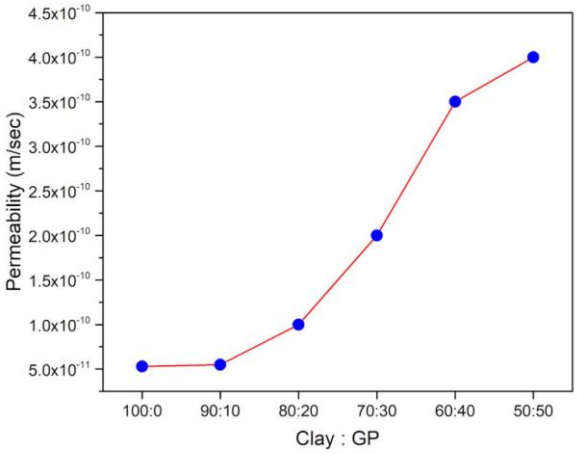
รูปที่ 8 แสดงการทดสอบแห้งและเปียกสำหรับส่วนผสม C:GP 90:10, 80:20, และ 70:30 ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วน C:GP 70:30 มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 2,445.89, 1,670.55, และ 1,218.68 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ที่รอบการบ่ม 3, 7, 9, และ 12 รอบ สำหรับส่วนผสม C:GP 90:10, และ 80:20 ตัวอย่างยังคงสภาพอยู่ได้แต่มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่า C:GP 70:30 แสดงว่าทุกตัวอย่างมีค่าความแข็งแรงสูงสุดในรอบที่สามของการทดลอง สำหรับตัวอย่าง C:GP 70:30 ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างยังคงสูงกว่าเกณฑ์วัสดุรองพื้นทางแม้ผ่านไป 12 รอบ

จากรูปที่ 9 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในการทดสอบแห้งและเปียก สำหรับตัวอย่าง C:GP 60:40 และ 50:50 นั้นพบว่า ในรอบที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าร้อยละ 10 เมื่อดำเนินการทดสอบต่อไปในรอบที่สามปรากฏว่าตัวอย่างสลายตัวเสียก่อน คงเหลือแต่ตัวอย่าง C:GP 70:30; 80:20 และ 90:10 โดยพบว่าตัวอย่าง C:GP 70:30 มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุดในรอบที่ 1 ถึง 12 สูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 1.5 ถึง 7.2 แสดงว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชั่นที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์มากที่สุดจึงทำให้เกิดโครงข่ายการเชื่อมประสานที่แข็งแรงสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ตามรูปที่ 8



รูปที่ 9 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างและรอบการทดสอบแห้งและเปียก

4.3.8 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจากตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างที่มีการเชื่อมประสานจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น การเตรียมตัวอย่างกระทำทางอ้อมผ่านอุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยดำเนินการทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วันเท่านั้น เนื่องจากเมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้นตัวอย่างมีสภาพทึบน้ำ ไม่สามารถทดสอบได้ ผลการทดสอบแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านอยู่ในช่วง $5x10^{-11}$ ถึง $3.5x10^{-10}$ เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของจีโอโพลิเมอร์ดินขาว เถ้าแกลบ

5. สรุปผลการทดสอบ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีทรัพยากรดินอยู่อย่างมากมายหลากหลายประเภท ดินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญมากชนิดหนึ่ง เนื่องจากดินเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่หาได้ง่ายราคาถูกมากเมื่อเทียบกับวัสดุทางวิศวกรรมอื่น ๆ แต่บางครั้งดินที่มีอยู่ในปริมาณมากกลับไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากสมบัติทางวิศวกรรมไม่เป็นไปตามที่ต้องการ งานวิจัยเรื่องนี้ศึกษาการนำดินเหนียวมาใช้ประโยชน์ในงานทาง โดยนำมาปรับปรุงให้มีสมบัติทางวิศวกรรมสูงขึ้นด้วยสารสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติและวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมเกษตรมากระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สรุปเป็นประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

5.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จากการทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (q_u) ของจีโอโพลิเมอร์ดินขาวผสมเถ้าแกลบ (KA:RA) และกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณร้อยละของดินขาวต่อเถ้าแกลบ 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนักและปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำใช้ความเข้มข้น 8 โมลาร์ (Molar) ที่ปริมาตร OMC ที่อายุ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน โดยตัวอย่างสัดส่วนที่ 70:30 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดมากที่สุด ภายใต้อุณหภูมิการบ่ม 25°C, 50°C, 70°C และ 90°C เท่ากับ 7,664, 10,292, 12,919, และ 11,331 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ

5.2 ดินเหนียวปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์

5.2.1 จากการทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (q_u) ของดินเหนียวผสมจีโอโพลิเมอร์และกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณร้อยละของดินเหนียวต่อจีโอโพลิเมอร์ โดยน้ำหนักและปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำใช้ความเข้มข้น 8 โมลาร์ (Molar) ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่อายุ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน โดยตัวอย่างดินเหนียวต่อจีโอโพลิเมอร์สัดส่วนที่ 70:30 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดมากที่สุด ภายใต้อุณหภูมิการบ่ม 50°C และ 70°C เท่ากับ 6,280 และ 13,625 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ

5.2.2 จากการทดสอบความแข็งแรงดึงแบบแยกเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงดึงสูงสุด (T_R) ของดินเหนียวผสมจีโอโพลิเมอร์และกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณร้อยละของดินเหนียวต่อจีโอ โพลิเมอร์ 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนักและปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำใช้ความเข้มข้น 8 โมลาร์ (Molar) ที่ปริมาตร OMC ที่อายุ 7 วัน 14 วัน 28 วัน โดยตัวอย่างสัดส่วนที่ 70:30 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงมากที่สุด คือ 1,404 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

5.2.3 จากการทดสอบด้วยวิธีกระบวนการแห้งและเปียก เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (q_u) สำหรับตัวอย่างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอก-ไซด์ ที่อายุตัวอย่าง 7, 14, 28 จำลองสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่ 3, 7, 12 รอบ โดยตัวอย่างสัดส่วนที่ 70:30 มีค่ากำลังที่สูงและทนทานที่สุดเนื่องจากมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด ที่ 2,445.89 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (3 รอบ), 1,670.55 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (7 รอบ) และ 1,218.68 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (12 รอบ)

5.2.4 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยอัตราส่วน 70:30 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบใช้ความดันเข้าช่วย (Constant Head) ที่อุณหภูมิน้ำ 25 องศาเซลเซียส (Coefficient, K 20°C) ในดินเหนียว

มีค่าเท่ากับ 4.89×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที จากการทดสอบในอัตราส่วนอื่นๆ ไม่สามารถรายงานผลการทดสอบได้เนื่องจากน้ำไม่สามารถซึมผ่านตัวอย่างได้ (ทึบน้ำ)

5.3 ผลการทดสอบเมื่อเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง

5.3.1 ความแข็งแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดตามมาตรฐาน ทล.-ท.105/2515 ซึ่งเป็นมาตรฐานเทียบเคียง ASTM D2166 กำหนดค่าความแข็งแรงอัดไม่ถูกจำกัดที่อายุ 7 วัน ทดสอบโดยนำตัวอย่างแช่น้ำนาน 24 ชั่วโมง นำมาเช็ดผิวแห้งต้องมีค่าความแข็งแรงไม่ต่ำกว่า 1,716.25 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินเหนียว (C) ปรับคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเถ้าแกลบ (GP) อัตราส่วน C:GP 70:30 มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 9,352.43 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร สำหรับการบ่มที่อุณหภูมิ 70°C และมีค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 4,557 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิการบ่ม 50 °C ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน โดยมีกำลังความแข็งแรงเป็น 5.4 และ 2.65 เท่าตามลำดับ

5.3.2 ความแข็งแรงดึงแบบแยก อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3967 ซึ่งระบุว่าค่าความแข็งแรงดึงทางอ้อมต้องสูงกว่าดินที่ไม่ผสมจีโอโพลิเมอร์มากกว่าร้อยละ 5 จากผลการทดสอบกำลังรับแรงของตัวอย่างดินเหนียว (C) ปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเถ้าแกลบ (GP) อัตราส่วน C:GP 90:10, 80:10, 70:30 ที่อายุ 7 วัน มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 618.67, 873.92, และ 1,382.83 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าความแข็งแรงดึงแยกของตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ผสมจีโอโพลิเมอร์ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันซึ่งเท่ากับ 529.58 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 16, 65 และ 161 ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปี 2563 เลขที่ FTE-2563-09

7. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Voottipruex, C. Teerawattanasuk and I. Meepon, "Marginal lateritic soil treated using ceramic waste for rural road application," *International Journal of GEOMATE,* vol. 16, no. 53, pp. 70-77, 2019.

[2] J. Davidovits, " Geopolymers: inorganic polymeric new materials," *Journal of Thermal Analysis and calorimetry,* vol. 37, no. 8, pp. 1633-1656, 1991.

[3] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez and J. Provis, "Geopolymer technology: the current state of the art," *Journal Material Science,* vol. 42, p. 2917–2933, 2007.

[4] K. Khomcom, S. Nontananandh, B. Vardhanabhuti, P. Kamhangrittirong and P. Tengya, "Stabilization of Soft Bangkok Clay with Geopolymer Produced from Alkaline Activated Fly Ash," in *The 16th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, Thailand, 2011. (in Thai)

[5] W. Sungwornpatansakul and W. Thitasatcha, " Durability of Kaolin Stabilized by Polymerization Technique," *KKU Engineering Journal,* vol. 33, no. 5, pp. 511-524, 2006. (in Thai)

[6] P. Voottipruex, S. Horpibulsuk and C. Teerawattanasuk, " Bagasse ash–fly ash-geopolymer-treated soft Bangkok clay as subgrade material," *Environmental Geotechnics,* 2020.

[7] U. Ratanasak and P. Chindaprasirt, " Rice Husk Ash in Concrete," Thailand Concrete Association, Thailand, 2009. (in Thai)

[8] T. Poltue, A. Suddeepong, S. Horpibulsuk, W. Samingthong, A. Arulrajah and A. Aashid, " Strength development of recycled concrete aggregate stabilized with fly ash-rice husk ash based geopolymer as pavement base material," *Road Mater. Pavement Des,* vol. 21, no. 8, pp. 2344-2355, 2019.

[9] A. Arulrajah, T. Kua, C. Phetchuay and S. Horpibulsuk, "Spent coffee grounds–fly ash geopolymer used as an embankment structural fill material," *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 28, no. 5, 2016.

[10] A. Arulrajah, A. Mohammadinia, A. D'Amico and S. Horpibulsuk, "Cement kiln dust and fly ash blends as an alternative binder for the stabilization of demolition aggregates," *Construction and Building Materials,* vol. 145, pp. 218-225, 2017.

[11] A. Arulrajah, M. Yaghoubi and M. Disfani, " Evaluation of fly ash and slag based geopolymers for the improvement of soft marine clay by deep soil mixing," *Soils and Foundations,* vol. 58, no. 6, pp. 1358-1370, 2018.

[12] D. Hardjito, S. Wallah, D. Sumajouw and B. Rangan, " Fly Ash-based Geopolymer Concrete," *Australian Journal of Structural Engineering,* vol. 6, pp. 77-85, 2005.

[13] E. Nimwinya, W. Arjharn, S. Horpibulsuk, T. Phoo-ngernkham and A. Poowancum, " Sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer," *Journal of Cleaner Production,* vol. 119, pp. 128-134, 2016.

[14] I. Phummiphan, S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Arulrajah, S. Shen and P. Chindaprasirt, "High calcium fly ash geopolymer stabilizedlateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavementbase material," *J. Hazard. Mater,* vol. 341, pp. 257-267, 2018.

[15] C. Teerawattanasuk and P. Voottipruex, "Comparison between cement and fly ash geopolymer for stabilized marginal lateritic soil as road material," *International Journal of Pavement Engineering,* vol. 20, no. 11, pp. 1264-1274, 2019.

[16] T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt , "Fly Ash and Bio-mass Ash Based Geopolymer Pastes Part I: Effect of Mix Proportion on Compressive Strength," *Research and Development Journal,* vol. 19, no. 2, pp. 9-16, 2008. (in Thai)

[17] *Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, ASTM standards D3967,* 1981.

[18] *Department of Highway of Thailand. RoadConstruction Supervision, Standard Test Unconfined Compressive Strength, DH-T105/1972, 1972.* (in Thai).