

**การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์
และน้ำยางพารา**
**Study on the Engineering Properties of Soil-Cement Mixed Bagasse Ash
Geopolymer and Para Rubber Latex**

นพดล สุตสุข¹, ชุศักดิ์ คีรีรัตน์^{1*}, ศุภชัย ไทยพุม¹ และ ปิยะพงศ์ กิ่วสวัสดิ์คอน¹

Noppadon Sudsui, Chusak Kererat, Supachai Thaipum and Piyapong Kesawadkorn

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
วิทยาเขตวังไกลกังวล ถนนเพชรเกษม อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin Wong Klai Kangwon Campus, Petchkasem Road, HuaHin, Prachuap Khiri Khan

* E-mail: chusak.k@mutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์และน้ำยางพารา โดยใช้ดินตัวอย่างจัดอยู่ในกลุ่มดินลูกรังชนิด จ ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง เถ้าขานอ้อยที่ใช้ถูกนำมาผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตัวอย่างทดสอบได้จากการนำดินมาผสมกับเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกส์จำนวน 5 อัตราส่วน ได้แก่ 80:19:1, 80:18:2, 80:17:3, 80:16:4 และ 80:15:5 ใช้สารกระตุ้นแทนน้ำซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ในสัดส่วน 10:90 ใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อน้ำยางพาราจำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 90:10 และ 80:20 ดำเนินการทดสอบค่าแรงอัดแกนเดียวเมื่อตัวอย่างมีอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทุกอัตราส่วนทั้งกรณีแช่น้ำและไม่แช่น้ำสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาเกณฑ์การนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์พบว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีส่วนผสมของน้ำยางพาราต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 และร้อยละ 5 สำหรับกรณีไม่แช่น้ำและแช่น้ำตามลำดับ สำหรับกรณีที่ส่วนผสมของน้ำยางพาราร้อยละ 10 และ 20 ต้องการปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ทั้งกรณีไม่แช่น้ำและแช่น้ำ แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำยางพาราเป็นส่วนผสมช่วยให้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้ โดยส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ 80:17:3 ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 10

คำสำคัญ: กำลังอัดแกนเดียว ดินซีเมนต์ เถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ น้ำยางพารา

Abstract

This study investigates the engineering properties of cement-stabilized lateritic soil incorporating bagasse ash-based geopolymer and Para rubber latex. The soil was classified as type E lateritic soil according to subbase material specifications. Bagasse ash was sieved through a No. 325 standard sieve prior to use. Test specimens were prepared by blending soil, bagasse ash, and hydraulic cement at five mix proportions by weight: 80:19:1, 80:18:2, 80:17:3, 80:16:4, and 80:15:5. An alkaline activator, used in place of water, consisted of a mixture of sodium silicate solution and 5 M sodium hydroxide solution at a ratio of 10:90. The activator-to-Para rubber latex ratios were set at 100:0, 90:10, and 80:20. Unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted on specimens cured for 7, 14, and 28 days under soaked and unsoaked conditions. The results indicate that UCS values consistently

increased with increasing cement content and Para rubber latex content for all curing conditions. For subbase applications, specimens without Para rubber latex required cement contents of 4% and 5% to satisfy strength requirements under unsoaked and soaked conditions, respectively. In contrast, specimens containing 10% and 20% Para rubber latex met the strength criteria with only 3% cement for both conditions. These findings demonstrate that the incorporation of Para rubber latex significantly enhances strength performance and enables a reduction in cement content. The optimum mixture identified in this study consisted of soil, bagasse ash, and cement at a ratio of 80:17:3 combined with 10% Para rubber latex.

Keywords: Unconfined Compressive Strength, Soil-Cement, Bagasse Ash Geopolymer, Para Rubber Latex

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีความต้องการก่อสร้างและซ่อมแซมโครงสร้างพื้นฐานทางถนนเพิ่มขึ้นซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุชั้นทางที่มีความแข็งแรงและเสถียรภาพสูง (ติณณภพ พูลทวี และ รัตมณี นันทสาร, 2566) การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ (Soil-Cement Stabilization) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นทางและลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินได้ (กัญจน์ สลึงค์, 2563) อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวมักมีข้อจำกัดเนื่องจากลักษณะ แข็งเปราะ (Brittle) และมีความต้านทานต่อน้ำหรือความชื้นต่ำ ซึ่งอาจส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมากเมื่อใช้งานไปในระยะยาว (วัชรระ ศรีสะเกศ และคณะ, 2568) นอกจากนี้ การผลิตปูนซีเมนต์ยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน (กคมณ กิตติสยาม และคณะ, 2563) ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาการนำวัสดุผลพลอยได้ (By Product Materials) และวัสดุเถ้าชีวมวล (Biomass Ash) มาแทนที่ปูนซีเมนต์ (Awadalseed et al., 2022; Liu et al., 2025)

เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลและไฟฟ้าชีวมวลที่มีปริมาณมหาศาลในประเทศไทย (ยงยุทธ บำรุงพล และคณะ, 2565) การกำจัดวัสดุเหล่านี้ด้วยการฝังกลบก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและมีค่าใช้จ่ายสูง (Yayex et al., 2026) อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์พบว่าเถ้าขานอ้อยมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณสูง (Basack et al., 2021) จึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานทางเลือกแทนปูนซีเมนต์ได้ การใช้จีโอโพลิเมอร์ไม่เพียงแต่ช่วยลดปัญหาขยะอุตสาหกรรม แต่ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Olawale et al., 2024; Rihan et al., 2024) เพื่อแก้ไขปัญหาความเปราะของดินซีเมนต์ งานวิจัยในปัจจุบันได้หันมาให้ความสนใจกับการนำน้ำยางพารา (Para Rubber Latex) มาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่ม (Kerarat et al., 2022; Hawa et al., 2023; Barrera et al., 2025) เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตน้ำยางพารารายใหญ่ของโลก การนำน้ำยางมาใช้ในการงานวิศวกรรมจึงเป็นการช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิตทางการเกษตร น้ำยางพารามีคุณสมบัติพิเศษในการ ยืดหยุ่น ยึดเกาะสูง และต้านทานความชื้นได้ดี ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเหนียว ลดการแตกร้าว และลดการดูดซึมน้ำของดินซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (กาญจนา ปินวิเศษ, 2560)

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพดินมักมุ่งเน้นการผสมด้วยปูนซีเมนต์ หรือวัสดุจีโอโพลิเมอร์ หรือน้ำยางพารา เพียงอย่างเดียวหนึ่ง แต่ยังไม่มีการวิจัยที่นำวัสดุทั้งสามชนิดมาใช้ร่วมกัน จึงมีแนวคิดในการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ปรับปรุงด้วยการผสมผสานระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ และน้ำยางพารา โดยมุ่งหวังที่จะพัฒนาวัสดุสำหรับงานทางให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดด้านกำลังตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ลดการใช้ปูนซีเมนต์ เพิ่มความยืดหยุ่น ลดการซึมผ่านน้ำ เพื่อเป็นแนวทางในการใช้เป็นข้อมูลทางเลือกสำหรับการพัฒนาวัสดุงานทางในอนาคตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ

ดินตัวอย่างนำมาจากพื้นที่ในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ลักษณะเป็นเม็ดดินปนหิน มีสีน้ำตาลอมแดง (รูปที่ 1ก) มีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.53 ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) ขีดจำกัดพลาสติก (PL) และดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับ ร้อยละ 25.42 ร้อยละ 15.70 และร้อยละ 9.72 ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.92 กรัม/ลบ.ซม. และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เท่ากับร้อยละ 11.0 มีค่า ซี.บี.อาร์. น้อยกว่า 25 จึงไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานวัสดุรองพื้นทางของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ. 2102 – 57) นำมาร่อนตะแกรงมาตรฐานแต่ละขนาดโดยผสมขนาดแต่ละให้เป็นไปตามมาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง ชนิด จ เมื่อนำมาจำแนกประเภทของดินด้วยวิธีเอกภาพ (USCS) จัดอยู่ในกลุ่มทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand, SC)

เถ้าขานอ้อย (BA) นำมาจากโรงงานผลิตน้ำตาล อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยมีลักษณะสีดำเทาและมีน้ำหนักรวม (รูปที่ 1ข) มีสีน้ำตาลเทา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.34 นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จากข้อมูลการทำ SEM แสดงให้เห็นว่าเถ้าขานอ้อยมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม มีรูปทรงที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด มีรูพรุนเยาะ และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่าธาตุหลักที่ตรวจพบประกอบด้วยออกซิเจน (O) ร้อยละ 49.21, ซิลิกอน (Si) ร้อยละ 27.96, อะลูมิเนียม (Al) ร้อยละ 6.20 และเหล็ก (Fe) ร้อยละ 4.46 โดยมีค่าร้อยละโดยน้ำหนัก

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.05 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 มีส่วนประกอบหลักทางเคมีได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 58.55

สารละลายกระตุ้นด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเกล็ดสีขาว 200 กรัม ละลายในน้ำ 1000 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งมีความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงจะเพิ่มความหนืด (Sofri et al., 2020) ซึ่งอาจมีผลต่อการผสมให้เข้ากันได้ยาก



(ก)



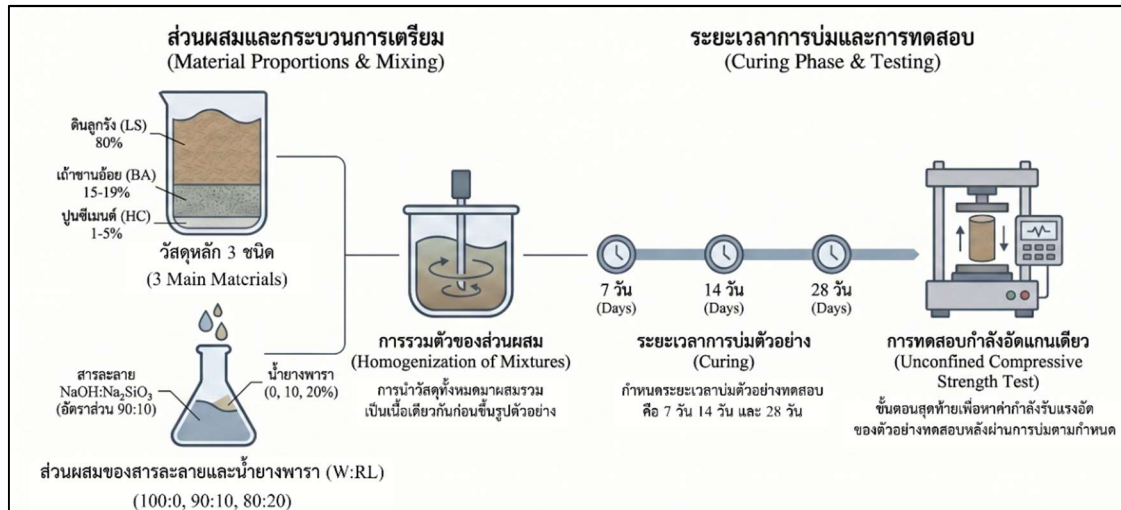
(ข)

รูปที่ 1 วัสดุทดสอบ (ก) ตัวอย่างดิน (ข) เถ้าขานอ้อย

น้ำยางพารา (RL) นำมาจากอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยผสมกับสารยัดอายุน้ำยางสด 9 กรัมต่อน้ำยางพารา 1 กิโลกรัม เมื่อทดสอบหาปริมาณเนื้อยางแห้งพบว่ามีความร้อยละ 42.44 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปคือ ร้อยละ 25 ถึง 45

2.2 การออกแบบอัตราส่วนผสม

งานวิจัยนี้กำหนด 5 อัตราส่วนผสมระหว่าง ดินลูกรัง (LS) : เถ้าขานอ้อย (BA) : ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) ดังนี้ 80:19:1, 80:18:2, 80:17:3, 80:16:4 และ 80:15:5 โดยน้ำหนัก กำหนดให้ดินลูกรังเป็นวัสดุหลัก ในสัดส่วนร้อยละ 80 ของทั้งหมด จะถูกผสมเข้ากับเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ในอัตราส่วนที่แปรผันแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนผสม จากนั้นเติมสารละลายกระตุ้นด่าง (W) และน้ำยางพาราธรรมชาติ (RL) ในสัดส่วน W : RL เท่ากับ 100 : 0, 90 : 10 และ 80 : 20 เพื่อช่วยในการยึดเกาะและปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำส่วนผสมที่ได้ไปเข้าสู่กระบวนการบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดไว้คือ 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ดังแผนผังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังอัตราส่วนผสม ระยะเวลาบ่มและการทดสอบ

2.3 การเตรียมตัวอย่างและทดสอบ

เมื่อดินตัวอย่างที่ค้ำตะแกรงแต่ละขนาดถูกนำไปอบให้แห้งและนำมาคละกันให้ได้ตามขนาดคละของวัสดุลูกรังชนิด จ แล้ว นำมาผสมกับเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามอัตราส่วนที่กำหนด (LS80BA19HC1, LS80BA18HC2, LS80BA17HC3, LS80BA16HC4 และ LS80BA15HC5) นำวัสดุผสมมาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ชิดจำกัดความชื้นเหลว และพารามิเตอร์การบดอัด (ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม) โดย การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน หลังจากนั้นจึงดำเนินการเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดแกนเดียวซึ่งจะควบคุม ระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ทุกตัวอย่างมีความสม่ำเสมอ โดยนำวัสดุผสมคลุกเคล้ากับสารกระตุ้นต่าง (NaOH:Na₂Si₃ สัดส่วน 90:10) ผสมกับน้ำยารพราตามสัดส่วนที่กำหนด (W100RB0, W90RB10 และ W80RB20) ให้เข้า กันด้วยเครื่องผสมขนาดเล็ก เมื่อผสมเสร็จแล้วใช้แบบหล่อท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 4 เซนติเมตร สูง 8 เซนติเมตร ริดด้วยเข็มขัดรัดท่อสแตนเลสในตำแหน่ง บน กลาง ล่าง เพื่อให้ก้อนตัวอย่างมีหน้าตัดที่เท่ากันสม่ำเสมอ สำหรับขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ โดยการบดอัดส่วนผสมในแบบหล่อพีวีซีแบ่งเป็น 5 ชั้น ชั้นละเท่า ๆ กัน ควบคุมความ หนาแน่นตามผลการทดสอบการบดอัดดิน โดยแต่ละอัตราส่วนผสมจะถูกเตรียมไว้ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งอายุการบ่ม เมื่อขึ้น รูปเสร็จทำการบ่มในแบบหล่อท่อพีวีซีพร้อมปิดรัดทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหย ออกจากก้อนตัวอย่างแล้วนำไปมในลังโฟม เมื่อครบอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ นำก้อนตัวอย่างทดสอบ ออกจากแบบหล่อท่อพีวีซี ดำเนินการหาค่าความหนาแน่นรวม แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะแช่ขัง ในชั้นโครงสร้าง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำตัวอย่างมาทดสอบแรงอัดแกนเดียวจนตัวอย่างวิบัติโดยการควบคุม ความเครียด (Strain) ในแนวตั้งให้คงที่ ด้วยอัตราความเร็ว 0.50 มิลลิเมตรต่อนาที และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลค่าแรงอัด แกนเดียว (UCS)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการทดสอบชิดจำกัดความชื้นเหลว

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและการทดสอบชิดจำกัดความชื้นเหลว ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและขีดจำกัดความชื้นเหลว

อัตราส่วน ดิน:เถ้าขานอ้อย:ปูนซีเมนต์ (LS:BA:HC)	ความ ถ่วงจำเพาะ	ขีดจำกัด เหลว (ร้อยละ)	ขีดจำกัด พลาสติก (ร้อยละ)	ดัชนี พลาสติก (ร้อยละ)	ดัชนี การไหล
100:00:00	2.53	25.42	15.70	9.72	2.14
80:19:01	2.27	31.88	11.48	20.40	4.64
80:18:02	2.31	32.20	14.71	17.49	7.92
80:17:03	2.34	33.24	16.67	16.57	9.77
80:16:04	2.38	34.13	18.75	15.38	11.99
80:15:05	2.41	35.12	20.83	14.29	12.19

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน และดินผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ดินเดิมที่ไม่มีการผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ (อัตราส่วน 100:00:00) ให้ค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 2.53 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทั่วไปของดินธรรมชาติที่มีแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้มีมวลต่อปริมาตรสูงกว่าวัสดุผสมอื่น เมื่อพิจารณาดินผสมที่มีการเติมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ในสัดส่วนดินคงที่ที่ร้อยละ 80 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับดินเดิม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.27–2.41 ทั้งนี้ ส่วนผสมที่อัตราส่วน 80:19:01 ให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 2.27 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อนำมาผสมกับดินในปริมาณมากจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะโดยรวมของดินผสมลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์จากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 5 (จากอัตราส่วน 80:19:01 ถึง 80:15:05) พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จาก 2.27 เป็น 2.41 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าขานอ้อย และเมื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน (Cementing Agent) จะช่วยลดช่องว่างภายในโครงสร้างของดินผสม ส่งผลให้มวลรวมของดินผสมต่อปริมาตรเพิ่มสูงขึ้น จากแนวโน้มดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของดินผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของวัสดุผสมอย่างชัดเจน โดยการเพิ่มปริมาณเถ้าขานอ้อยเพียงอย่างเดียวมีผลทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง ขณะที่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์สามารถชดเชยและเพิ่มค่าความถ่วงจำเพาะของดินผสมได้ ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านวิศวกรรมโยธาในอนาคต

ผลการทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg Limits) ได้แก่ ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก ค่าดัชนีพลาสติก และค่าดัชนีการไหล ของดินเดิมและดินผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า การเติมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์มีผลต่อพฤติกรรมเชิงพลาสติกของดินอย่างชัดเจน ดินเดิมที่ไม่มีการผสมวัสดุปรับปรุง (อัตราส่วน 100:00:00) มีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับร้อยละ 25.42 ขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 15.70 และค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับร้อยละ 9.72 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินเดิมจัดอยู่ในกลุ่มดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำถึงปานกลาง และมีความไวต่อน้ำค่อนข้างต่ำ เมื่อทำการผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ในสัดส่วนต่าง ๆ โดยคงปริมาณดินไว้ที่ร้อยละ 80 พบว่าค่าขีดจำกัดเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มจากร้อยละ 31.88 ในอัตราส่วน 80:19:01 ไปจนถึงร้อยละ 35.12 ในอัตราส่วน 80:15:05 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เถ้าขานอ้อยมีลักษณะเป็นวัสดุรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้ดินผสมมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น จึงต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเพื่อให้ดินเข้าสู่สถานะเหลว ในขณะเดียวกัน ขีดจำกัดพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 11.48 ในอัตราส่วน 80:19:01 เป็นร้อยละ 20.83 ในอัตราส่วน 80:15:05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์มีบทบาทในการปรับปรุงโครงสร้างของดิน โดยทำให้ดินเริ่มแสดงพฤติกรรมคล้ายวัสดุเนื้อแน่นมากขึ้น และลดช่วงความชื้นที่ดินสามารถเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกได้ สำหรับค่าดัชนีพลาสติก พบว่ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ จากร้อยละ 20.40 ในอัตราส่วน 80:19:01 ลดลงเหลือร้อยละ 14.29 ในอัตราส่วน 80:15:05 แม้ว่าค่านี้จะสูงกว่าดินเดิมในบางสัดส่วน แต่แนวโน้มการลดลงสะท้อนให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ช่วยลดความไวของดินต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ โดยเกิดปฏิกิริยาประสาน (Cementation) และการยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินและเถ้าขานอ้อย นอกจากนี้ ค่าดัชนีการไหลมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากร้อยละ 2.14 ในดินเดิม เป็นร้อยละ 12.19 ในอัตราส่วน 80:15:05 แสดงให้เห็นว่าดินผสมมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของสภาพความชื้นเหลือต่อปริมาณน้ำสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มความไวต่อความชื้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการรวมกับการลดลงของค่าดัชนีพลาสติก แสดงให้เห็นว่าดินผสมมีพฤติกรรมที่เปลี่ยนจากดินพลาสติกไปสู่ดินที่มีโครงสร้างคงตัวมากขึ้น

3.2 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ผลจากการหาพารามิเตอร์การบดอัดจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

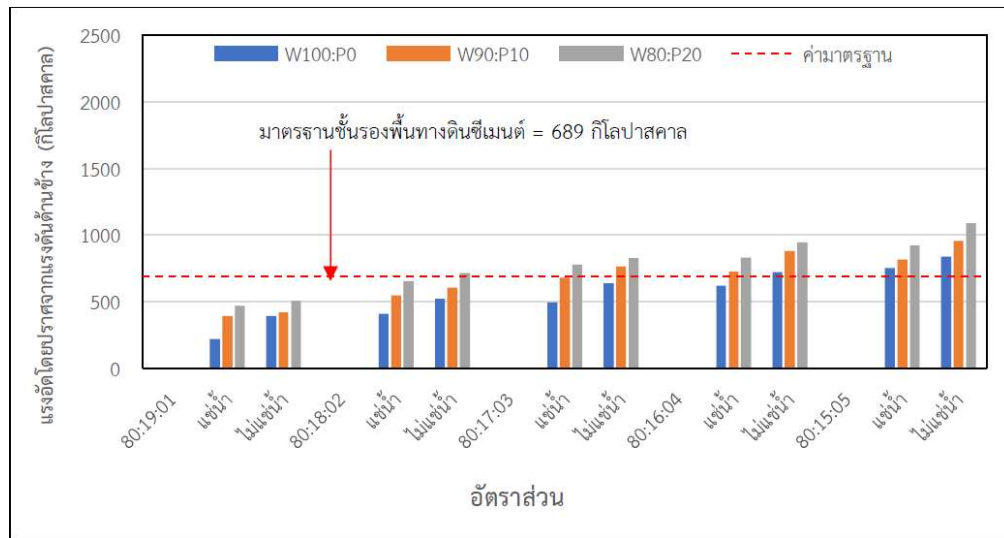
อัตราส่วน (ดิน:เถ้าขานอ้อย:ปูนซีเมนต์)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลบ.ซม.)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
100:00:00	1.92	11.0
80:19:01	1.90	10.2
80:18:02	1.89	12.7
80:17:03	1.84	12.7
80:16:04	1.84	12.1

จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ของดินเดิมและดินผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยพิจารณาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม พบว่า การเติมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ส่งผลต่อพฤติกรรมการบดอัดของดินอย่างชัดเจน ดินเดิมที่ไม่มีการผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ (อัตราส่วน 100:00:00) ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมร้อยละ 11.0 ซึ่งสะท้อนถึงโครงสร้างดินตามธรรมชาติที่สามารถเรียงตัวแน่นได้ภายใต้พลังงานบดอัดสูง เมื่อทำการผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ โดยคงสัดส่วนดินไว้ที่ร้อยละ 80 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับดินเดิม โดยลดลงจาก 1.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรในอัตราส่วน 80:19:01 ไปจนถึง 1.84 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรในอัตราส่วน 80:17:03 และ 80:16:04 แนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำและมีลักษณะเป็นรูพรุน ทำให้เมื่อผสมเข้ากับดินจะเพิ่มปริมาณช่องว่างภายในโครงสร้างดิน ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินผสมลดลง แม้จะใช้พลังงานบดอัดสูงกว่ามาตรฐานก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kererat et al. (2022) ในส่วนของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม พบว่าดินผสมมีค่าความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินเดิม โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10.2–12.7 ทั้งนี้ อัตราส่วน 80:18:02 และ 80:17:03 ให้ค่าความชื้นที่เหมาะสมสูงสุดเท่ากับร้อยละ 12.7 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบขีดจำกัดเหลวจากตารางที่ 1 ที่แสดงให้เห็นว่าดินผสมมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวสูงและลักษณะรูพรุนของเถ้าขานอ้อย เมื่อพิจารณาผลการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ พบว่า แม้ปูนซีเมนต์จะมีบทบาทในการช่วยประสานเม็ดดินและลดความเป็นพลาสติกของดิน แต่ในช่วงสัดส่วนที่ศึกษา (ร้อยละ 1–4) ยังไม่ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ทั้งนี้ อาจเนื่องจากผลของเถ้าขานอ้อยที่มีความหนาแน่นต่ำยังมีอิทธิพลเหนือกว่า อย่างไรก็ตาม การคงที่ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ประมาณ 1.84 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรในสัดส่วน 80:17:03 และ 80:16:04 สะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มเสถียรภาพของโครงสร้างดินผสมเมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพียงพอในการช่วยยึดประสานอนุภาค

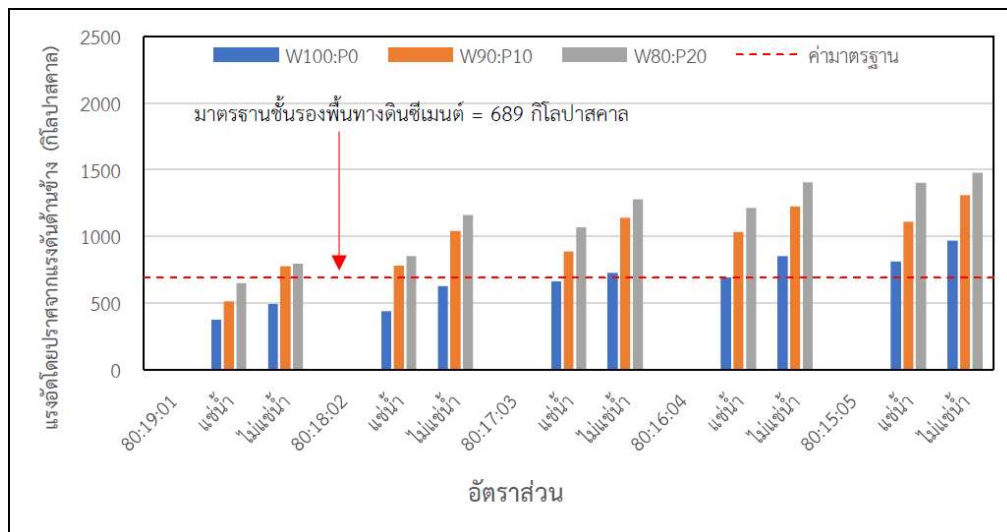
3.3 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 - 5 ซึ่งแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเฉลี่ยของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์และน้ำยางพารา ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกินร้อยละ 5 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล.-ม.206/2532) ซึ่งกำหนดให้วัสดุชั้นรองพื้นทางต้องมีกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 689 กิโลปาสคาล โดยภาพรวมพบว่ากำลังรับแรงอัดของดินผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่มในทุกอัตราส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าอายุการบ่มเป็นปัจจัยสำคัญต่อการ

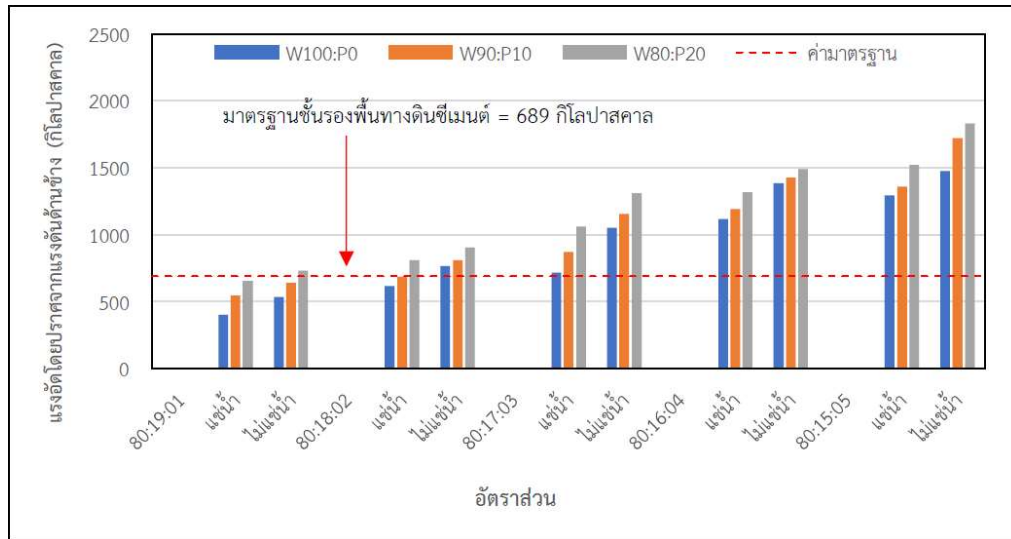
พัฒนากำลังของดินซีเมนต์ อันเนื่องมาจากการกระบวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันของเถ้า
ขานอ้อยที่ดำเนินไปอย่างค่อยเป็นค่อยไป ส่งผลให้โครงสร้างภายในของดินมีการยึดประสานที่แน่นหนาและต่อเนื่องมากขึ้น



รูปที่ 3 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบ ที่อายุการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบ ที่อายุการบ่ม 14 วัน



รูปที่ 5 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบ ที่อายุการบ่ม 7 วัน และปริมาณน้ำยาพาราไรยละ 0, 10 และ 20 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำยาพารา โดยอัตราส่วนที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 3 ขึ้นไป ร่วมกับการผสมน้ำยาพาราไรยละ 10 และ 20 สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ 689 กิโลปาสคาล ตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงได้อย่างเด่นชัด แม้ในกรณีตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของตัวอย่างทดสอบในการพัฒนากำลังรับแรงอัดต้นควบคู่กับความทนทานต่อสถานะความชื้น ทั้งนี้ พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากกลไกทางเคมีของการทำงานร่วมกันระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำหน้าที่เป็นตัวประสานหลัก และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของเถ้าขานอ้อยภายใต้สภาวะที่ช่วยกระตุ้นการละลายของซิลิกาและอลูมินา ซึ่งก่อให้เกิดโครงข่ายเจลที่เติมเต็มช่องว่างในระดับจุลภาค การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์จึงไม่เพียงเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยตรง แต่ยังส่งเสริมปฏิกิริยาทางเคมีร่วมระหว่างแคลเซียมและสารประกอบซิลิโกอะลูมิเนต ส่งผลให้โครงสร้างดินมีความต่อเนื่องและแข็งแรงมากขึ้นตั้งแต่ระยะต้นของการบ่ม นอกจากนี้ การเติมน้ำยาพารายังช่วยสร้างฟิล์มโพลิเมอร์ที่เคลือบล้อมอนุภาคดินและผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยา เพิ่มความเหนียวและความยืดหยุ่นของโครงสร้าง ลดผลกระทบจากการแช่น้ำ และช่วยให้ดินผสมสามารถรักษากำลังรับแรงอัดไว้ได้ในระดับสูง จึงทำให้ดินปรับปรุงคุณภาพดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐานกรมทางหลวง และมีศักยภาพเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ แม้ในช่วงอายุการบ่มระยะสั้นเพียง 7 วัน

สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบ ที่อายุการบ่ม 14 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอายุการบ่ม 7 วัน ในทุกอัตราส่วนผสม สะท้อนถึงการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ต่อเนื่องตามเวลา โดยอัตราส่วนที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 2-3 ขึ้นไป ร่วมกับการผสมน้ำยาพาราไรยละ 10 และ 20 สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดเป็นไปตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงอย่างสม่ำเสมอ ทั้งในกรณีไม่แช่น้ำและแช่น้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพัฒนากำลังและความทนทานต่อสถานะความชื้นของดินผสมที่ดีขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากความสมบูรณ์มากขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของเถ้าขานอ้อย ซึ่งช่วยสร้างโครงสร้างการยึดประสานที่ต่อเนื่องและหนาแน่นในระดับจุลภาคมากขึ้น นอกจากนี้ ตัวอย่างทดสอบที่มีการเติมน้ำยาพารายังคงแสดงค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงจากการแช่น้ำน้อยกว่ากรณีไม่เติมน้ำยาพารา บ่งชี้ว่าน้ำยาพารามีบทบาทในการเพิ่มความเหนียว ความยืดหยุ่น และเสถียรภาพของโครงสร้างดินซีเมนต์-จีโอโพลิเมอร์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบ ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบกับอายุการบ่ม 7 และ 14 วัน ในทุกอัตราส่วนผสม ทั้งในกรณีไม่แช่น้ำและแช่น้ำ สะท้อนถึงการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ต่อเนื่องตามระยะเวลาการบ่ม โดยอัตราส่วนที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 2 ขึ้นไป

ไป ซึ่งในช่วงอายุการบ่ม 7 วัน บางกรณีให้ค่ากำลังใกล้เคียงหรือเพิ่มผ่านเกณฑ์มาตรฐาน 689 กิโลปาสกาล เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 14 และ 28 วัน พบว่าสามารถผ่านเกณฑ์ดังกล่าวได้อย่างสม่ำเสมอ และให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในตัวอย่างทดสอบที่มีการเติมน้ำยางพารา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรักษากำลังเมื่อแช่น้ำได้ดีกว่าในช่วงอายุการบ่มที่สั้นกว่า แนวโน้มดังกล่าวบ่งชี้ว่าการเพิ่มอายุการบ่มช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันของเถ้าขานอ้อยดำเนินไปอย่างสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างการยึดประสานภายในดินมีความหนาแน่นและเสถียรภาพสูงขึ้น ทำให้สมรรถนะเชิงกลและความทนทานต่อสภาวะความชื้นเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์

4. สรุปผล

การศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งพิจารณาจากข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติดินการบดอัด และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การผสมเถ้าขานอ้อยร่วมกับปูนซีเมนต์และน้ำยางพารามีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินอย่างมีนัยสำคัญ โดยทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง ขณะที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น อันเป็นผลจากลักษณะรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงของเถ้าขานอ้อย

2) ปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญในการลดความเป็นพลาสติกและเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างดิน ผ่านกลไกการยึดประสานจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้ดินมีพฤติกรรมเชิงกลที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้านวิศวกรรมโยธา

3) กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำยางพารา และอายุการบ่ม โดยดินผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 2-3 ขึ้นไป ร่วมกับการเติมน้ำยางพาราร้อยละ 10 และ 20 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่ระยะบ่มต้น

4) การเพิ่มอายุการบ่มจาก 7 เป็น 14 และ 28 วัน ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและสม่ำเสมอ สะท้อนถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันของเถ้าขานอ้อยที่ดำเนินไปตามเวลา

5) การเติมน้ำยางพาราช่วยเพิ่มความเหนียว ความยืดหยุ่น และความสามารถในการคงกำลังรับแรงอัดภายใต้สภาวะแช่น้ำ แสดงถึงความทนทานต่อความชื้นที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างดินซีเมนต์-จีโอโพลิเมอร์

6) ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีส่วนผสมของน้ำยางพาราต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 และร้อยละ 5 ทั้งกรณีไม่แช่น้ำและแช่น้ำ ตามลำดับ เพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์วัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ แต่เมื่อมีส่วนผสมของน้ำยางพาราร้อยละ 10 และ 20 สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงเหลือร้อยละ 3 ทั้งกรณีไม่แช่น้ำและแช่น้ำ แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำยางพาราเป็นส่วนผสมช่วยให้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้ โดยส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ 80:17:3 ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุดที่ยังสามารถให้ค่าแรงอัดแกนเดียวเป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

จากผลการศึกษานำไปใช้เป็นแนวทางเลือกใช้วัสดุชั้นรองพื้นทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามก็ควรศึกษาเชิงลึกเพิ่มเติมในระดับจุลภาค เช่น การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย SEM และ XRD เพื่อยืนยันกลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของดิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานผลิตน้ำตาล อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าขานอ้อย และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือในการทดสอบ ทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง. (2532). *ทล.-ม.206/2532 มาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง*.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). *มยผ. 2102-57 มาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง (Subbase)*.

- กัญจน์ สลิวงค์. (2563). *การปรับปรุงดินลูกรังด้วยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์-โพลีเมอร์* [วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่]. CMU Intellectual Repository.
https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2563/enci11263gans_full.pdf
- กาญจนา ปิ่นวิเศษ. (2560). *การพัฒนาถนนดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. Thammasat University Digital Repository.
https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU_2017_5610034018_8861_9175.pdf
- ดิณณภ พูลทวี และรัตมณี นันทสาร. (2566). การปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหินเวียนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขาน
อ้อยสำหรับชั้นพื้นทาง. *วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 23(2), 1-13.
- วัชร ตรีสะกุล, สุศักดิ์ เกตุบุญนาท, ประสาร จิตรเพ็ชร, และ ธนันท์ ขุบอุปการ. (2568, 28–30 พฤษภาคม). ผลกระทบ
ของน้ำยางพาราคู่คุณสมบัติของวัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์. ใน *รายงานสืบเนื่องจากการประชุม
วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30* (น. GTE-23). ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
<https://conference.thaince.org/index.php/ncce30/article/view/3737/1648>
- ยงยุทธ บำรุงพล, เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง, นันทชัย ชูศิลป์, และ จุฑามาศ
ลักษณะกิจ. (2565, 24–26 สิงหาคม). การปรับปรุงดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานโดยใช้เถ้าขี้เถ้า จีโอโพลิเมอร์.
ใน *รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27* (น. GTE40–1). มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
<https://conference.thaince.org/index.php/ncce27/article/view/1383/1121>
- Awadalseed, W., Zhao, H., Sun, H., Huang, M., & Liu, C. (2022). Expansive soil stabilization by bagasse
ash in partial replacement of cement. *Journal of Renewable Materials*, 11(4), 1911-1935.
<https://doi.org/10.32604/jrm.2023.025100>
- Barrera, G., Paim, L. L., dos Santos, R. J., Cabrera, F. C., dos Reis, E. P., Sánchez, J. C., Carvalho, J. J.,
Ossa, A., & Job, A. E. (2025). The effect of surface treatments on the mechanical properties of
low-density polyethylene/natural rubber composites reinforced with sugarcane bagasse ash.
Journal of Composites Science, 9(9), 1-28. <https://doi.org/10.3390/jcs9090489>
- Basack, S., Goswami, G., Khabbaz, H., Karakouzian, M., Baruah, P., & Kalita, N. (2021). A comparative
study on soil stabilization relevant to transport infrastructure using bagasse ash and stone
dust and cost effectiveness. *Civil Engineering Journal*, 7(11), 1947-1963.
<http://dx.doi.org/10.28991/cej-2021-03091771>
- Hawa, A., Salaemae, P., Abdulmatin, A., Ongwuttiwat, K., & Prachasearee, W. (2023). Properties of palm
oil ash geopolymers containing alumina powder and field para rubber latex. *Civil Engineering
Journal*, 9(5), 1271-1288. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-05-017>
- Kerarat, C., Kroehong, W., Thaipum, S., & Chindaprasit, P. (2022). Bottom ash stabilized with cement
and para rubber latex for road base applications. *Case Studies in Construction Materials*, 17,
Article e01259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01259>
- Liu, W., Burato, H. B., Tan, J., Huang, X., & Ackah, F. S. (2025). A review on improving the key engineering
properties of lateritic soil by treating industrial by-products and wastes. *Case Studies in
Construction Materials*, 23, Article e04856. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04856>
- Olawale, A. Y., Aremu, O. O., Atinuke, S. R., Adeyemi, A. T., & Omosalewa, O. R. (2024). Investigation of
sugarcane bagasse ash(SBA)-based engineered geopolymers mortar reinforced with coconut
fibre for engineered geopolymer composites. *International Journal of Innovative Science and
Research Technology*, 9(8), 2713-2723. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24AUG1514>

- Rihan, M. A. M., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024). Mechanical and microstructural properties of geopolymer concrete containing fly ash and sugarcane bagasse ash. *Civil Engineering Journal*, 10(4), 1292-1309. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-04-018>
- Sofri, L. A., Abdullah, M. M. A. B., Hasan, M. R. M., & Huang, Y. (2020). The influence of sodium hydroxide concentration on physical properties and strength development of high calcium fly ash based geopolymer as pavement base materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 864(1), Article 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012016>
- Yayek, P., Kojing, H., & Sorum, N. G. (2026). Sustainable subgrade soil stabilization using sugarcane bagasse ash: A comprehensive review on geotechnical, microstructural, and environmental performance. *Civil and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.2478/cee-2026-0078>