

พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์

Compaction Characteristics and Uniaxial Compressive Strength of Low-quality Crushed Rocks Mixed with Sugar Cane Ash and Cement

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข^{1*} สุนิต ประเวระทั้ง¹ สิริวิชญ์ สีหา¹ ธนันทน์ ฉายาพงศ์¹ พรเทพ แข็งขัน¹ และ กฤต อินทรกุล¹

Thaweesak Pitikhunpongsuk^{1*}, Sunit Prawerathang¹, Sirawit Seeha¹, Tananon Chayapong¹,

Pornthep Khaengkun¹ and Krit Intarakul¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ ศึกษาการนำหินปลายตะแกรงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมม่หิน ผสมกับเถ้าชานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ที่ส่วนผสมระหว่างหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย (R/A) เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยผสมกับซีเมนต์คงที่ เท่ากับ 4% โดยน้ำหนักแห้ง เพื่อใช้เป็นสารเชื่อมประสานในการบดอัดเตรียมตัวอย่างโดยวิธี Modified Compaction โดยใช้ความชื้นที่เหมาะสม เท่ากับ 12% เพื่อการเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ ผลการทดสอบพบว่า ทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยที่ส่วนผสม 90/10 มีค่ากำลังอัดดีที่สุด คือ 34 ksc และ 58 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วันและ 14 วัน ตามลำดับ กำลังอัดที่ส่วนผสมอื่น คือ 80/20, 70/30 และ 60/40 มีกำลังต่ำกว่า กำลังอัดที่ส่วนผสม 90/10 อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย (R/A) ที่ส่วนผสม 80/20, 70/30 และ 60/40 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง สำหรับใช้ในงานวัสดุชั้นรองพื้นทางและวัสดุชั้นพื้นทาง

ABSTRACT

This research study investigated the potential use of low-quality crushed rock (which is by-products from rock crushing plant) mixed with sugar cane ash (which is by-products from sugar industry) at the ratios of R/A for 90/10, 80/20, 70/30 and 60/40 with the addition of cement content at 4% by dry weight. Optimum moisture content (OMC) at 12% was used to prepare specimens by modified compaction. Based on unconfined compressive strength (q_u), test results showed that the specimen ratio at 90/10 was the best mixing ratio with the q_u values of 34 ksc and 58 ksc at the curing time of 7 days and 14 days respectively. Other R/A mixing ratios of 80/20, 70/30 and 60/40 showed lower strength values compared to that of 90/10. However, the strength values at these R/A mixing ratios (80/20, 70/30 and 60/40) showed the potential use as materials for subbase course and base course for roads according to the standard of Department of Highway.

Key words: Sugar cane ash, pozzolanic materials, soil Improvement, modified compaction, soil cement

* Corresponding author; e-mail address: fengtwj@ku.ac.th

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างถนนเพิ่มมากขึ้นตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ จึงทำให้มีความต้องการใช้วัสดุสำหรับงานก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น ถนนหนทาง (Roads) เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญอย่างยิ่งของประเทศ ในการนำพาความเจริญทางเศรษฐกิจและความสะดวกสบายจากในเมืองไปยังชนบท และการขนส่งจากชนบทมาสู่ในเมือง กล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ถนนถือได้ว่าเป็นสิ่งก่อสร้างสำคัญในการเดินทางและการขนส่ง ดังนั้น วัสดุที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนจึงมีความสำคัญมาก วัสดุที่ขาดคุณภาพส่งผลให้ถนนพังเร็วกว่าเวลาอันควร ชั้นทางในหลักของวิศวกรรมทางในงานก่อสร้างถนนแบ่งออกเป็น 3 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นผิวทาง ในการออกแบบชั้นทาง ผู้ออกแบบจะคัดเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทาง ส่วนมากจะเป็นวัสดุจำพวก หินคลุก ดินลูกรัง และหินฝุ่น เป็นต้น (กรมทางหลวง, 2532; กรมทางหลวง, 2556; ทวีศักดิ์, 2556; ทวีศักดิ์และสุนิต, 2563)

อย่างไรก็ตาม วัสดุก่อสร้างเหล่านี้มีวันยิ่งหาได้ยากและราคาสูงขึ้น ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้ นำเสนอแนวทางการปรับปรุงคุณภาพหินปลายตะแกรงและเถ้าขาน้อย จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมไมหินและอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 2 ประเภทมาผสมซีเมนต์ เพื่อเป็นปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น เพื่อเสนอเป็นแนวทางการใช้เป็นวัสดุทดแทนสำหรับงานก่อสร้างทาง (ชัย, 2555; ทวีศักดิ์, 2556; จิรวัฒน์, 2560; สุวิมล, 2546)

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้ประกอบด้วย การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพหินปลายตะแกรงและเถ้าขาน้อย ได้แก่ Sampling moisture content, Liquid limit, Plastic limit, Plasticity index, Grain Size Analysis, Fine content (soil passing sieve no.200) และ Specific gravity(G_s) เพื่อนำผลการทดสอบไปใช้ในการจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) และระบบ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จากนั้น ทำการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดแบบ Modified Compaction ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อย ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง หินปลายตะแกรงต่อเถ้าขาน้อย (R/A) เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density หรือ MDD) และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด (Optimum Moisture Content หรือ %OMC) ค่าเฉลี่ย %OMC ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่าง หินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยและซีเมนต์ แบบดินซีเมนต์บดอัด (Compacted Soil-Cement) เพื่อใช้เป็นวัสดุตัวอย่าง (Specimens) ในการศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยและซีเมนต์ ผลการทดสอบกำลังอัดเป็นผลทดสอบที่นำไปใช้ประเมินการนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมโยธา กล่าวคือ บทความนี้นำเสนอ พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยผสมซีเมนต์ เพื่อศึกษาแนวโน้มการใช้เถ้าขาน้อยผสมซีเมนต์ ในการแทนที่หินคลุกปลายตะแกรง เพื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างชั้นทางตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณสมบัติทางกายภาพของหินปลายตะแกรงและเถ้าขาน้อย

หินปลายตะแกรงที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ ดังรูป Figure 1 เป็นวัสดุที่ได้มาจากโรงโม่หินศิลาเจริญกิจ จาก จ.สระบุรี มีลักษณะเป็นทรายสีเทาปนสีดำ รูปร่างเป็นเม็ดเหลี่ยม โดยมีดินเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดปนคละกัน Table 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของหินปลายตะแกรง ได้แก่ ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index เท่ากับ 20.60%, 16.92% และ 3.68% ตามลำดับ ผลทดสอบการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน แสดงดังรูป Figure 3 พบว่า หินปลายตะแกรงมีดินเม็ดละเอียด (ดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ปนอยู่ประมาณ 10% จากคุณสมบัติทางกายภาพของหินปลายตะแกรง จำแนกประเภทดินได้เป็น SW-SC ตามระบบ USCS และจัดเป็น ดินกลุ่ม A-2-4 ตามระบบ AASHTO กล่าวคือ หินปลายตะแกรงจัดเป็นทรายที่มีขนาดคละดีและมีดินเหนียวผสม อยู่ (Well-graded sand with clay) งานวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้หินปลายตะแกรงที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับงานทดสอบทางวิศวกรรม

เถ้าขาน้อยที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ ดังรูป Figure 2 เป็นวัสดุที่ได้มาจากโรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น จาก จ.ขอนแก่น มีลักษณะเป็นผงดินคละยั้งสีด้า คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าขาน้อย ดังตาราง Table 1 พบว่า เถ้าขาน้อยเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials หรือ NP) ผลทดสอบการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน แสดงดังรูป Figure 3 พบว่า เถ้าขาน้อยมีดินเม็ดละเอียด (ดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ปนอยู่ประมาณ 48.5% จากคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าขาน้อยจำแนกประเภทดินได้เป็น ทรายปนทรายบั้ง หรือ Silty Sand (SM) ตามระบบ USCS โดยเถ้าขาน้อยจัดอยู่ในกลุ่ม A4 ตามระบบ AASHTO เมื่อทดลองนำหิน ปลายตะแกรงมาผสมกับเถ้าขาน้อยและซีเมนต์ ดังรูป Figure 4 พบว่า เถ้าขาน้อยผสมซีเมนต์มีการรวมตัว เป็นก้อน (Clod-like materials) ผสมเข้ากับหินปลายตะแกรงมีแนวโน้มทำให้การบดอัดทำได้ง่ายขึ้น



Figure 1 Low-quality crushed rocks used in this study from Saraburi Province.



Figure 2 Sugar cane ash used in this study from Khon Kaen Province.

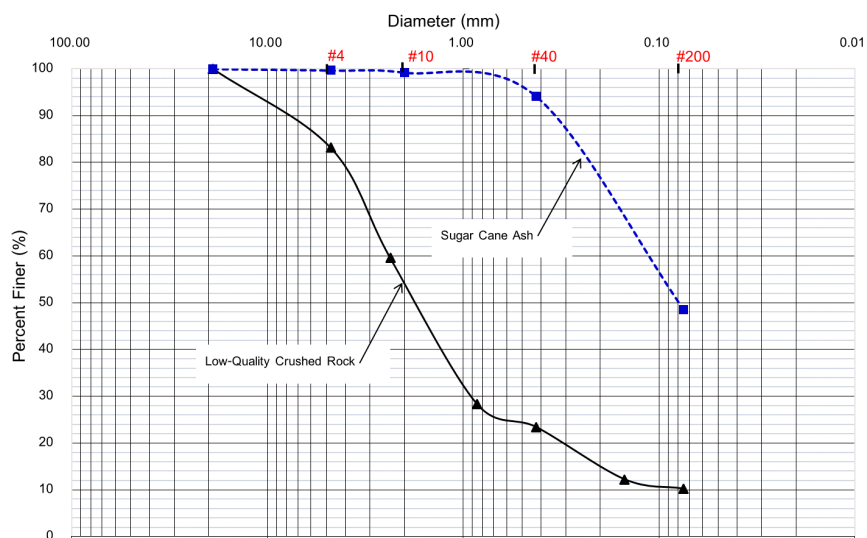


Figure 3 Gradation curves of materials (low-quality crushed rocks and sugar cane ash) in this study.

Table 1 Physical properties of Low-quality crushed rocks and Sugar cane ash used in this study.

Physical Properties	Low-quality crushed rocks	Sugar cane ash
Sampling moisture content (%)	2.1-3.5	9.3
Atterberg's soil content (Soil passed sieve no.40) (%)	23.42	95.14
Liquid limit (LL) (%)	20.60	NP*
Plastic limit (PL) (%)	16.92	NP*
Plasticity index (PI) (%)	3.68	NP*
Fine content (Soil passed sieve no.200) (%)	10.23	48.5
Specific gravity (G_s)	2.65	2.15
Soil classification by USCS	SW-SC	SM
Soil classification by AASHTO	A-2-4	A4

*NP หมายถึง วัสดุไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials)

พฤติกรรมการบดอัดหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยและซีเมนต์

พฤติกรรมการบดอัดแบบ modified compaction ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยที่ส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูป Figure 5 พบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด (%OMC) มีค่าอยู่ในระหว่าง 9% ถึง 14.5% โดยความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อย มีค่าระหว่าง $1,890 \text{ kg/m}^3$ ถึง $1,910 \text{ kg/m}^3$ มีค่าเฉลี่ยประมาณ $1,900 \text{ kg/m}^3$ และมีค่าเฉลี่ย %OMC เท่ากับ 12.1% ดังสรุปไว้ใน Table 2 ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้ใช้ปริมาณความชื้น 12% ในการบดอัดเตรียมตัวอย่างสำหรับงานทดสอบทางวิศวกรรม

จากรูป Figure 5 แสดงพฤติกรรมการบดอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อย (R/A) ที่อัตราส่วนผสม 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 พบว่า เมื่อส่วนผสมเถ้าขาน้อยเพิ่มขึ้น ทำให้ %OMC ที่ใช้ในการบดอัดสูงขึ้นและความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก เถ้าขาน้อยมีคุณสมบัติคล้ายทรายแป้ง (SM) ที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials หรือ NP) และไม่ดูดซับน้ำระหว่างการบดอัด ทำให้มีการบดอัดยากขึ้นเมื่อมีส่วนผสมเถ้าขาน้อยมากขึ้น เพราะว่า อนุภาคเถ้าขาน้อยไม่ดูดซับน้ำและมีน้ำเยิ้มและเม็ดดินล่อยกระจาย กล่าวคือ มีลักษณะการ Bleeding ระหว่างอนุภาคเถ้าขาน้อยกับน้ำในระหว่างการบดอัด



Figure 4 Low-quality crushed rocks mixed with sugar cane ash and cement becoming compactable clod-like materials.

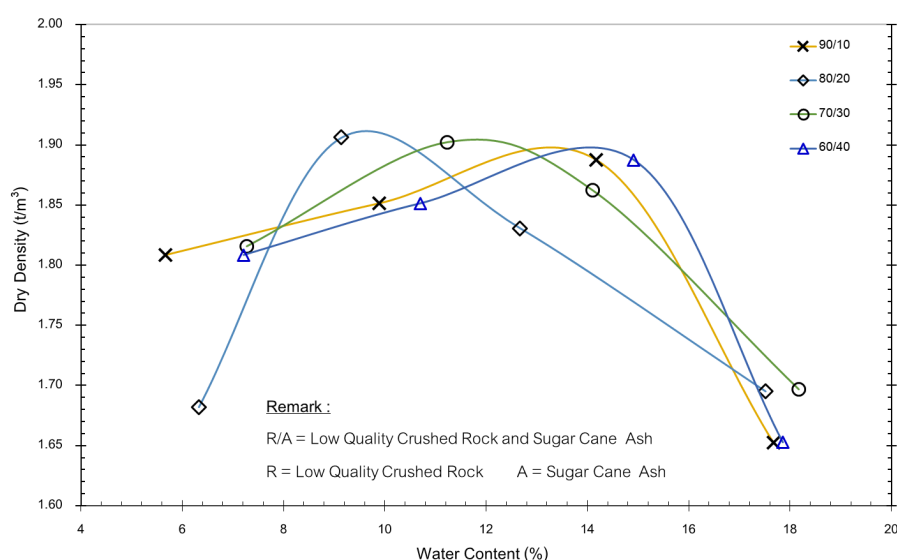


Figure 5 Compaction curves of low quality crushed rocks mixed with sugar cane ash.

Table 2 Maximum dry density and Optimum Moisture Content

R/A	90/10	80/20	70/30	60/40	Average
MDD (t/m ³)	1.90	1.91	1.90	1.89	1.90
%OMC	13.0	9.0	12.0	14.5	12.1

กำลังอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยและซีเมนต์

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว(Uniaxial Compressive Strength, q_u) ของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยและซีเมนต์ จากตัวอย่างที่ส่วนผสมของหินปลายตะแกรงต่อเถ้าขาน้อย (R/A) เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยการผสมซีเมนต์ คงที่ 4% โดยน้ำหนักแห้ง แล้วทำการเตรียมตัวอย่าง โดยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ที่ปริมาณความชื้น เท่ากับ 12 % โดยตัวอย่างที่บดอัดแล้วแล้วจะถูกบ่มให้มีการพัฒนากำลังอัดไว้ที่อายุ 7 วัน และ 14 วัน ดังแสดงในรูป Figure 6 เมื่อครบอายุการบ่มตัวอย่างแล้วจะนำตัวอย่างไปแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



Figure 6 Curing of specimens at 7 and 14 days.

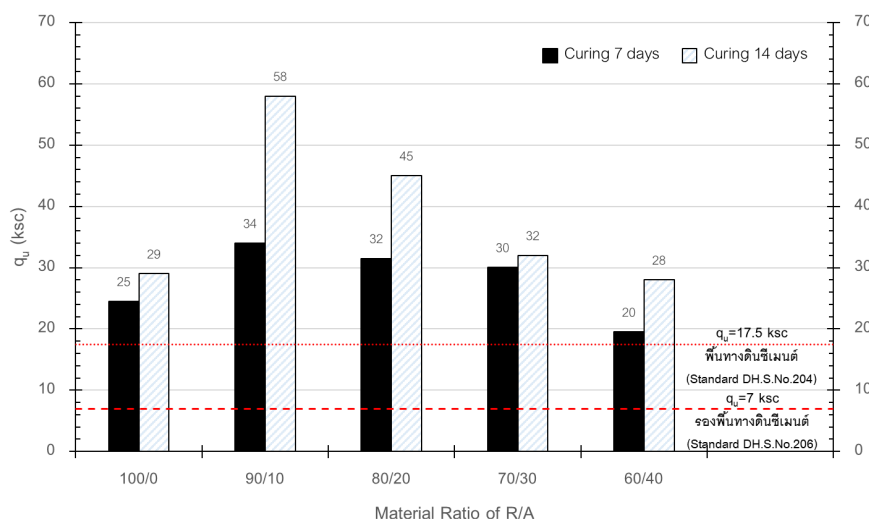


Figure 7 Unconfined compressive strength of low-quality crushed rocks mixed with sugar cane ash and 4% cement.

ผลการทดสอบ ดังรูป Figure 7 พบว่า หินปลายตะแกรงผสมเถ้าขาน้อยและซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม กล่าวคือ กำลังอัดที่อายุ 14 วัน มีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน ตัวอย่างที่ส่วนผสม R/A เท่ากับ 90/10 คือ ตัวอย่างที่มีหินปลายตะแกรง 90% ผสมกับเถ้าขาน้อย 10% และซีเมนต์ 4% คงที่ โดยน้ำหนักแห้ง มีกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกำลังอัดของส่วนผสมอื่น โดยที่อายุการบ่ม 7 และ 14 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด (q_u) ประมาณ 34 kg/cm² และ 58 kg/cm² ตามลำดับ

ผลการทดสอบ แสดงว่า การใช้เถ้าขาน้อยเป็นส่วนผสมมากขึ้น มีผลให้กำลังอัดลดลง (กล่าวคือ กำลังอัดที่ส่วนผสม 90/10 > 80/20 > 70/30 > 60/40) อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ส่วนผสม R/A เท่ากับ 60/40 (หินปลายตะแกรง 60% ผสมเถ้าขาน้อยที่ 40% และซีเมนต์ 4% คงที่ โดยน้ำหนักแห้ง) ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังอัดต่ำประมาณ 20 ksc แต่ค่ากำลังอัดในระดับนี้ ยังคงถือว่าเป็นกำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ ทล.ม.204 สำหรับใช้

ในงานวัสดุพื้นทางดินซีเมนต์ เท่ากับ 17.5 ksc (กรมทางหลวง, 2556) และผ่านมาตรฐาน ทล.ม.206 สำหรับใช้ในงานวัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ เท่ากับ 7 ksc (กรมทางหลวง, 2532) โดยทั่วไป ดินซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ดังนั้น การใช้เถ้าชานอ้อย 40% ทดแทนหินปลายตะแกรง จัดว่ามีแนวโน้มใช้ในงานวัสดุก่อสร้างทางได้ การใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวใกล้เคียงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานสอดคล้องกับการนำไปใช้งานได้จริง โดยไม่ก่อให้เกิดความล่าช้าในการทำงานในสนามที่โดยทั่วไปมีการกำหนดให้งานบดอัดก่อสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นไม่ควรเกิน 7 วัน

สรุป

1. หินปลายตะแกรงที่นำมาทำการศึกษาค้นคว้า จัดกลุ่มดินตามระบบ Unified Soil Classification System ได้เป็น SW-SC ลักษณะเป็นทรายขนาดคละดีและมีกรวดกับดินเหนียวผสมอยู่(Well-graded sand with clay and gravel) ตามระบบ AASHTO ได้เป็นกลุ่ม A-2-4 ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.65 ค่า Liquid Limit เท่ากับ 20.60%, Plastic Limit เท่ากับ 16.92%, Plasticity Index เท่ากับ 3.68% และมีค่าความชื้นจากสถานที่เก็บตัวอย่าง เท่ากับ 2.1-3.5%
2. เถ้าชานอ้อยที่นำมาทำการศึกษาค้นคว้า จัดกลุ่มดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ได้เป็นดินทรายผสมทรายแป้งที่ไม่มีความเหนียว (Silty Sand) หรือ SM และตามระบบ AASHTO จำแนกได้เป็นดินกลุ่ม A4 ค่าความถ่วงจำเพาะ Specific gravity (G_s) ประมาณ 2.15 เถ้าชานอ้อยไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก (Non-Plastic) และมีค่าความชื้นจากสถานที่เก็บตัวอย่าง เท่ากับ 9.30 %
3. พฤติกรรมการบดอัดของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อย ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) อยู่ระหว่าง 1.89 -1.91 t/m^3 โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.90 t/m^3 และมีค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ในการบดอัดอยู่ในช่วง 9% ถึง 14.50 % โดยมีค่า %OMC เฉลี่ยเท่ากับ 12.1 % ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ใช้ในการบดอัดเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม
4. ผลการทดสอบ UCS แสดงว่า ทุกส่วนผสมของหินปลายตะแกรงผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ 4% มีแนวโน้มค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยที่สัดส่วนการเถ้าชานอ้อย 10% ($R/A = 90/10$) เป็นสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่สุด คือ 34 ksc และ 58 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วันและ 14 วัน ตามลำดับ
5. การใช้เถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น ที่ 20% ($R/A = 80/20$) ถึง 40% ($R/A = 60/40$) ส่งผลให้กำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 มีค่ามากกว่า 17.5 ksc ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทาง
6. ผลการศึกษา แสดงว่า การปรับปรุงหินปลายตะแกรงโดยการผสมเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์ มีแนวโน้มนำไปใช้งานได้จริงสำหรับการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างชั้นทาง การใช้เถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นการเพิ่มคุณค่าวัสดุเหลือทิ้ง ช่วยลดปริมาณการใช้หินปลายตะแกรงลงได้
7. จากผลการศึกษาครั้งนี้ มีข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้ คือ
 - 7.1 การศึกษาผลการพัฒนากำลัง ที่อายุการบ่มมากขึ้น ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน, 56 วัน และ 90 วัน

- 7.2 การใช้วัสดุปอซโซลานอื่นๆ เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าลอย เถ้าแกลบ เป็นต้น เพื่อลดปริมาณการใช้หินคลุกปลายตะแกรง ข้อดีของการใช้วัสดุผสมเพิ่มอื่นๆ มีผลต่อการพัฒนากำลังของวัสดุชั้นทางในระยะยาว โดยเป็นไปตามกลไกการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ โรงงานไฟฟ้าน้ำตาลขอนแก่น ที่มีอบวัสดุเถ้าชานอ้อย และโรงงานโมหินศิลาเจริญกิจ จ.สระบุรี สำหรับวัสดุหินปลายตะแกรงเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เชื้อเชิญสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมทางหลวง. 2532. **มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)**. ทล.ม.206 (Standard DH.S.No.206). กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ.
- กรมทางหลวง. 2556. **มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)**. ทล.ม. 204 (Standard DH.S.No.204). กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ.
- จิรวุฒิ วิมุติสุขวิริยา. 2560. **คุณสมบัติเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์และหินฝุ่น**. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 2 , มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม (RMU GRC 2017). มหาสารคาม. หน้า 542 ถึง 547.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2555. การใช้เถ้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. **วารสารคอนกรีต**. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. 2556. การปรับปรุงหินคลุกด้วยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา** 24(3): 1-7
- ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข และ สุนิต ประเวระทั้ง. 2563. ศักยภาพการนำเถ้าชานอ้อยผสมซีเมนต์มาใช้ทดแทนวัสดุในงานทาง. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา** 31(2)11.
- สุวิมล สัจจาณิษฐ์. 2546. ผลกระทบของเถ้าชานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน. **วิศวกรรมสาร มก.** 48: 18-22.