การปรับปรุงดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐานด้วยสารอัลคาร์ไลน์เศษคอนกรีตและเถ้าชานอ้อย

STABILIZATION OF MARGINAL LATERITIC SOIL BY ALKALI-ACTIVATED RECYCLE CONCRETE AND BAGGAGE ASH

นายนัธทวัฒน์ วรรณศิริ[1]*, ชยกฤต เพชรช่วย[1], เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[1], จักษดา ธำรงวุฒิ[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
*Corresponding author; E-mail address: stablegrowth88@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐาน (CL) ด้วยสารอัลคาไลน์ เศษคอนกรีต และเถ้าชานอ้อย โดยใช้เถ้าชานอ้อย (BA) และเศษคอนกรีต (RCP) เป็นสารตั้งต้น และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารละลาย Alkali activator เพื่อนำวัสดุที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับงานถนน งานวิจัยนี้นี้ศึกษากำลังอัดของดินที่ถูกปรับปรุงแปรผันตามอัตราส่วนผสมของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานต่ออัตราส่วนสารเชื่อมประสานเท่ากับ 90:10 อัตราส่วนเศษคอนกรีตต่อเถ้าชานอ้อยที่ 100:0, 70:25, 66:33, 50:50, 33:66, 25:75 และ 0:100 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดร็อกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทดสอบที่สภาวะแช่น้ำ แปรผันอายุบ่มที่ 7 และ 28 วัน และแปรผันความชื้นที่ 0.8OWC, OWC และ 1.2OWC ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่อัตราส่วนผสมเศษคอนกรีตต่อเถ้าชานอ้อยที่ 25:75 (OWC = 737 kPa.) ที่อายุบ่ม 28 วัน ดังนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปปรับใช้กับงานมาตรฐานรองพื้นทางสำหรับงานถนน

คำสำคัญ: ดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐาน, เศษคอนกรีต, เถ้าชานอ้อย, สารอัลคาไลน์, การปรับปรุงคุณภาพดิน

Abstract

This research investigates the possibility of improving marginal lateritic soil by polymerization to be used as road material. The polymerization process uses bagasse ash (BA) and recycled concrete (RC) as a precursor and sodium alkali (NaOH) as an alkali activator, which is the process of using waste material for road material. The interested Variables of the improved soils are soil to the binder at 90:10, the ratio of RC to BA at 100:0, 70:25, 66:33, 50:50, 33:66, 25:75, and 0:100 NaOH concentration at eight molars, the unconfined compressive strength was tested at soaked, curing times at 7 and 28 days and varies water content at 0.8OWC, OWC, and 1.2OWC. The result found the highest strength at OWC ratio RC: BA at 25:75 (OWC = 737 kPa.) at 28 days. Therefore, it is possible to use improvement for road material.

Keywords: marginal lateritic soil, recycle concrete, bagasse ash, alkaline activator, soil improvement

1. บทนำ

มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต (Recycled Aggregate) เป็นมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ทิ้งแล้ว ได้แก่ เศษท่อคอนกรีต และเศษคอนกรีตทางเท้า ที่รื้อถอนออกเพื่อสร้างสิ่งปลูกสร้างใหม่ จึงทำให้มีเศษคอนกรีตเกิดขึ้นจำนวนมาก ที่ต้องนำไปถมที่หรือกำจัดทิ้ง ทำให้ต้องหาพื้นที่ทิ้ง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและเสียทัศนียภาพบริเวณที่นำวัสดุไปทิ้ง ดังนั้น หากสามารถนำเศษคอนกรีตมาใช้ในงานคอนกรีตได้ใหม่ก็จะช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวได้

เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยโรงงานน้ำตาลจะนำชานอ้อยที่ได้จากกระบวนการแปรรูปอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงานและกระแสไฟฟ้าส่วนที่เหลือใช้จากภายในโรงงานก็จะขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยกระบวนการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะได้เถ้าชานอ้อยเหลือทิ้งประมาณร้อย ละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย หรือประมาณสี่แสนตันต่อปี ทำให้ต้องกองทิ้งในบริเวณโรงงานน้ำตาลโดยไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ (Ganesan และคณะ 2007) [1]

ในปัจจุบันปัญหาแหล่งวัสดุตามธรรมชาติที่จะนำมาใช้ก่อสร้างทางลดน้อยลง ในประเทศไทยมีดินลูกรัง เป็นพื้นที่ประมาณ 68,765 ตารางกิโลเมตร หรือ คิดเป็นร้อยละ 13.4 ของพื้นที่ทั้งประเทศ พื้นที่ส่วนใหญ่ของดินลูกรังอยู่ทางตอนเหนือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบเล็กน้อยในภาคกลางและภาคใต้ โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือนั้น มีพื้นที่ถึงร้อยละ 42 ของพื้นที่ดินลูกรังทั่วประเทศ ซึ่งดินลูกรังถูกใช้เป็นวัสดุคัดเลือกและวัสดุชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างทางใหม่และงานขยายผิวทาง

เพื่อเพิ่มช่องจราจร ทำให้แหล่งวัสดุในธรรมชาติลดลงเนื่องจากถูกขุดมาใช้ในงานเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันจึงมีการการทดสอบนำเศษคอนกรีตที่เหลือทิ้งแล้วเข้ามาช่วยในงานก่อสร้าง เพื่อใช้ทดแทนและเพื่อลดการใช้ปริมาณดินลูกรังให้น้อยลงและยังรักษาดินในธรรมชาติอีกด้วย [2], [3]

จากปัญหาด้านมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งของเศษคอนกรีตและเถ้าชานอ้อย ตลอดจนปัญหาแหล่งวัสดุตามธรรมชาติที่จะนำมาทำชั้นโครงสร้างทางมีจำนวนลดน้อยลง ทำให้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุดังกล่าวมาใช้ เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ให้เกิดประโยชน์และเป็นการลดปัญหาที่เกิดจากวัสดุเหล่านี้อีกด้วย โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้เศษคอนกรีต เถ้าชานอ้อยและสารอัลคาไลน์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทดแทนการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน เพื่อใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางในงานถนน

2. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

2.1 เศษคอนกรีตและดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐาน

เศษคอนกรีตและดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน โดยเตรียมด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เศษคอนกรีตได้จากโครงการก่อสร้างทางแยกต่างระดับจุดตัดทางหลวงหมายเลข 231 กับทางหลวงหมายเลข 23 (แยกดงอู่ผึ้ง) (พร้อมทางคู่ขนาน) จ.อุบลราชธานี มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7 ดินลูกรังที่ได้จากพื้นที่บริเวณสวนสัตว์ จ.นครราชสีมา คุณสมบัติพื้นฐานแสดงในตารางที่ 1

รูปที่ 1 เศษคอนกรีตจากโครงการก่อสร้างทางแยกต่างระดับ (แยกดงอู่ผึ้ง) จ.อุบลราชธานี

รูปที่ 2 ดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐาน

2.2 เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash)

เถ้าชานอ้อย (BA) ได้จากโรงผลิตน้ำตาลครบุรี อ.ครบุรี จ.นครราชสีมา เถ้าชานอ้อยมีลักษณ์เป็นผงสีดำและเปียกชื้น ดังนั้น ก่อนการศึกษาจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.27 ส่วนประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 2

รูปที่ 3 เถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลละครบุรี

2.3 โซเดียมไฮดร็อกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เป็นสารเคมีของแข็งในรูปเม็ด (Bead) หรือแผ่นเกล็ด (Flake) มีมวลโมเลกุล 40 กรัม/โมล เมื่อนำมาใช้ต้องละลายน้ำ มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ สามารถแตกตัวให้อิออนโซเดียม (Na^+) และอิออนไฮดรอกไซด์ (OH^-)

รูปที่ 4 สารอัลคาไลน์ (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์)

2.5 วิธีการทดสอบ

นำดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน และวัสดุประสานที่อัตราส่วน (Binder, B) ที่อัตราส่วน S:B เท่ากับ 90:10 มาผสมให้เข้ากัน โดยที่ B เป็นส่วนผสมของเศษคอนกรีต (RCP) และเถ้าชานอ้อย (BA) ที่อัตราส่วน RCP:BA เท่ากับ 100:0, 75:25, 66:33, 50:50, 33:66, 25:75 และ 0:100 จากนั้นผสมโซเดียมไฮดร็อกไซด์ ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ผสมกับเถ้าชานอ้อย จากนั้นทำกันผสมให้เข้ากันแล้วนำไปผสมกับดิน ท้ายสุดตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบการบดอัดที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM D 1557 หลังจากได้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุด และปริมาณน้ำที่เหมาะสมของทุกอัตราส่วนแล้ว จะนำมาเตรียมเป็นก้อนตัวอย่าง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร และมีความสูงเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการ จนได้ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่ม นำตัวอย่างมาแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งแต่ละอัตราส่วนผสมจะเตรียมตัวอย่าง จำนวน 3 ตัวอย่าง

รูปที่ 5 ตัวอย่างทดสอบหลังการบดอัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐาน

Soil Property	
Specific Gravity ดินลูกรัง	2.85
Liquid Limit	22.1%
Plastic Limit	16.56%
Plastic Index	5.54%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	88.13%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	11.87%
California Bearing Ratio	16.0%
Unified Soil Classification	SP-SC

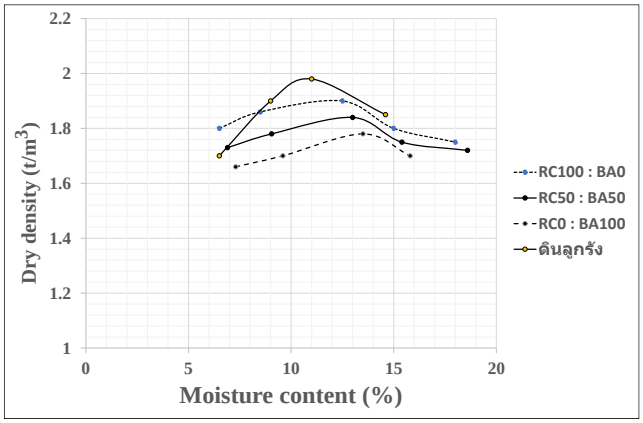
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของ BA

องค์ประกอบทางเคมี	BA (%)
SiO_2	62.60
Al_2O_3	5.69
Fe_2O_3	2.54
CaO	10.63
MgO	0.45
SO_3	0.03
Na_2O	-
K_2O	-
LOI	20.17

*การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-RAY FLUORESCENCE (XRF)

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

รูปที่ 6 แสดงกราฟการบดอัดดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานผสมกับน้ำ และ การบดอัดดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานที่ปรับปรุงด้วยเศษคอนกรีตผสมกับเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน S:B ที่ 90:10 อัตราส่วนเศษคอนกรีตต่อเถ้าชานอ้อยเท่ากับ 100:0, 75:25, 67:33, 50:50, 33:67, 25:75 และ 0:100 ที่พลังงานการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรังบดอัดที่ปรับปรุงด้วยเศษคอนกรีตและเถ้าชานอ้อย มีค่าน้อยกว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรังบดอัดผสมกับน้ำสำหรับทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเศษคอนกรีตและเถ้าชานอ้อยมีค่าน้อยกว่าดิน อีกทั้งค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินบดอัดผสมสารเชื่อมประสานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเถ้าชานอ้อยมีความพรุนสูงจึงทำให้ดูดซึมน้ำได้ดี [4]



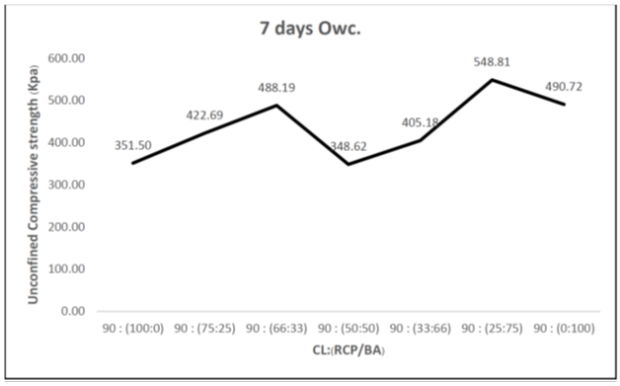
รูปที่ 6 กราฟบดอัดของดินลูกรังไม่ผ่านมาตรฐานผสมสารเชื่อมประสาน

รูปที่ 7-9 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว ที่อัตราส่วนผสมเศษคอนกรีต:เถ้าชานอ้อย 100:0, 75:25, 67:33, 50:50, 33:67, 25:75 และ 0:100 อายุบ่ม 7 วัน พบว่าค่ากำลังอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสมมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดเหมาะสมที่อัตราส่วน RCP:BA เท่ากับ 25:75 จากนั้นค่ากำลังอัดจะลดลงที่อัตราส่วน 0:100 ค่ากำลังอัดทางด้านเปียกที่ร้อยละ 110 และร้อยละ 120 จะมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน 66:33 และ 50:50 ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่อายุบ่ม 7 วัน ถ้าดินมีปริมาณความชื้นมากขึ้นต้องมีส่วนผสมของ RCP มากขึ้น กำลังอัดจะมีค่าที่สูงกว่าค่าเหมาะสมที่ OWC

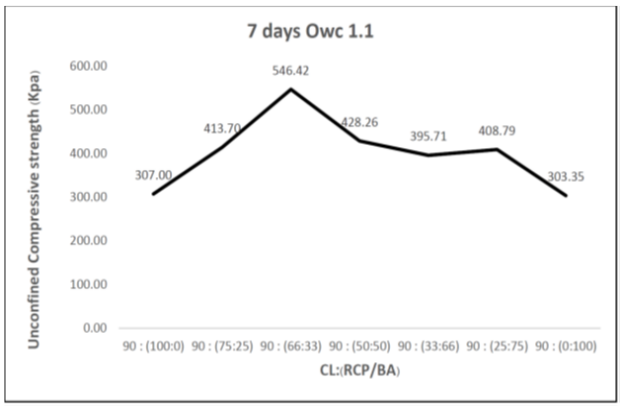
อีกประเด็นหนึ่งในผลการทดสอบรูปที่ 7 ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ BA ที่เพิ่มขึ้นและลดลงที่อัตราส่วน 50:50 และปรับตัวสูงขึ้นจนสูงสุดที่อัตราส่วน 25:75 สาเหตุที่เกิดขึ้นมีสมมุติเบื้องต้นจากค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกเกิดจากค่าความแน่นของตัวอย่างจากการบดอัด (packing effect) ส่วนที่สองเป็นปฏิกิริยาจากแคลเซียมในเศษคอนกรีตในปฏิกิริยา C-A-S-H ส่วนที่ 3 เกิดจากปฏิกิริยา

ของโซเดียมในสารอัลคาร์ไลน์ในปฏิกิริยา N-A-S-H ซึ่งในแต่ละส่วนผสมผสมมีอัตราส่วนในการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 ส่วนนี้ไม่เท่ากัน ซึ่งค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นจึงมีความแปรปรวนในแนวโน้มช่วงอายุการบ่มเริ่มต้น ในช่วงเริ่มต้นมีปริมาณ BA น้อย จะทำให้อิทธิพลหลักคือ ความแน่นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น จากปริมาณ BA ที่เพิ่มขึ้น แทรกตามช่องว่างในตัวอย่างจนถึงจุดเหมาะสม จากนั้นจะเป็นจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นของ CASH และ NASH จะเพิ่มขึ้นแทรกตามช่องว่างระดับ micro ซึ่งจะพบมากขึ้นตามอายุบ่มและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของปฏิกิริยา โดยที่อัตราส่วน 50:50 นั้นเลยจุดเหมาะสมของปฏิกิริยา packing effect และยังไม่ใช่จุดเหมาะสมของปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากปริมาณแคลเซียมมากเกินไปทำให้แย่งปริมาณความชื้นของปฏิกิริยา NASH และมีแคลเซียมอิสระมากนั้นทำให้มีการขัดขวางปฏิกิริยาต่างๆ ได้ [5], [6]

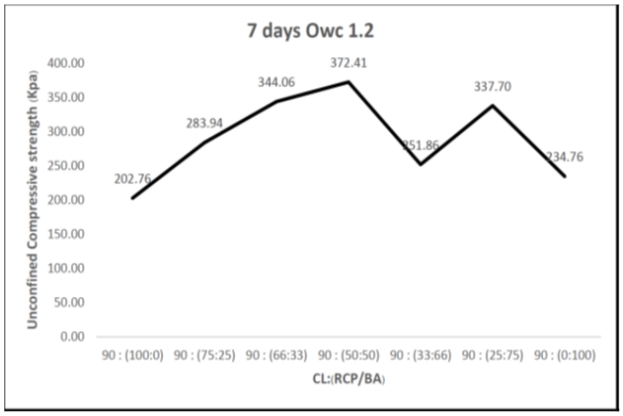
รูปที่ 10-12 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนผสมเศษคอนกรีต:เถ้าชานอ้อย 100:0, 75:25, 67:33, 50:50, 33:67, 25:75 และ 0:100 อายุบ่มที่ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสมมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดเหมาะสมที่อัตราส่วน RCP:BA เท่ากับ 25:75 จากนั้นค่ากำลังอัดจะลดลงที่อัตราส่วน 0:100 และค่ากำลังอัดทางด้านเปียกที่ร้อยละ 110 และร้อยละ 120 ก็มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดคล้ายกัน จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ส่วนผสมที่เถ้าชานอ้อยมากกว่าจะมีกำลังอัดที่ดีกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากมีปริมาณซิลิกากับอลูมินาสำหรับทำปฏิกิริยาปอซโซลานมีแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต C-A-S-H และ โซเดียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต N-A-S-H จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์มากกว่าทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่ดีกว่า นอกจากนั้นพบว่าที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงกว่าค่าปริมาณความชื้นอื่นๆ ทำให้มีโครงสร้างของดินที่แน่นและแข็งแรงกว่าส่งผลให้กำลังอัดที่ดีกว่าเมื่อเทียบที่ส่วนผสม RCP:BA เดียวกัน [7], [8]



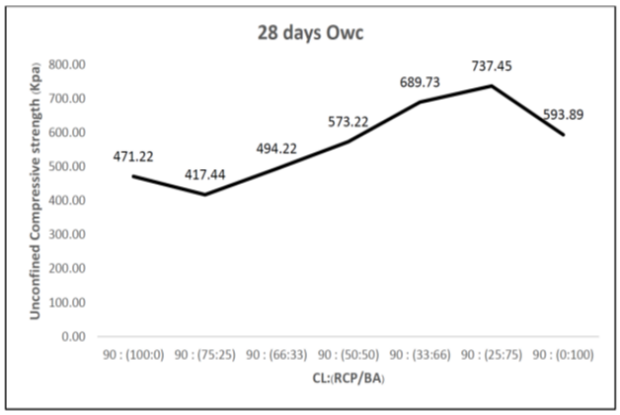
รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังอัด OWC อายุบ่ม 7 วัน



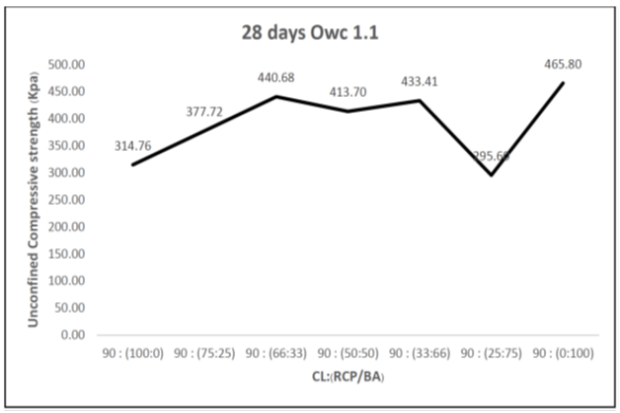
รูปที่ 8 ผลการทดสอบกำลังอัด 1.1OWC อายุบ่ม 7 วัน



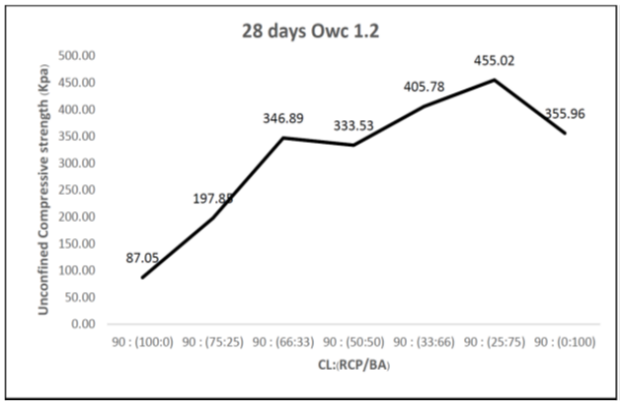
รูปที่ 9 ผลการทดสอบกำลังอัด 1.2OWC อายุบ่ม 7 วัน



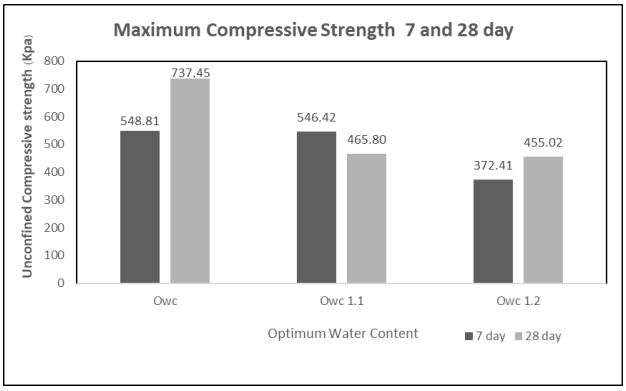
รูปที่ 10 ผลการทดสอบกำลังอัด OWC อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังอัด 1.1OWC อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 12 ผลการทดสอบกำลังอัด 1.2OWC อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 13 ค่าเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อกำลังอัด 7 วัน และ 28 วัน

ผลของอายุการบ่มต่อค่ากำลังอัดแสดงในรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุบ่มสูงขึ้นทำให้กำลังอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้นร้อยละ 34 ที่อัตราส่วน RCP:BA ที่ 25:75 โดยกำลังสูงกว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่ไม่ปรับปรุง เนื่องจากดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานบดอัด เมื่อผ่านการแช่น้ำก่อนทำการทดสอบ 2 ชั่วโมง ไม่สามารถทดสอบกำลังอัดแกนเดียวได้เนื่องจากตัวอย่างพังทลายจากการแช่น้ำ

4. สรุปผล

การผสมเศษคอนกรีตและเถ้าชานอ้อยร่วมกับสารอัลคาร์ไลน์สามารถเพิ่มคุณสมบัติการรับกำลังของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานได้เป็นอย่างดี โดยค่ากำลังเพิ่มขึ้นตามเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น และค่ากำลังสูงสุดจะอยู่ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน ที่ปรับปรุงด้วยเศษคอนกรีตต่อเถ้าชานอ้อย จะมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินลูกรังที่ผสมกับน้ำสำหรับทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเศษคอนกรีตและเถ้าชานอ้อยมีค่าน้อยกว่าดิน

การแปรผันความชื้นพบว่าค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดทุกส่วนผสม นอกจากนี้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผสมสารเชื่อมประสานที่ความชื้นด้านเปียกที่ร้อยละ 110 และ120 ของความชื้นเหมาะสม มีค่าลดต่ำลงมาตามลำดับ

ส่วนผสม RCP:BA ที่ 25:75 ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม อายุบ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 737 kPa สามารถใช้ในงานโครงสร้างถนนในชั้นรองพื้นทางได้ ซึ่งมีค่ามาตรฐานกำลังอัดอยู่ที่ 689 kPa [9]

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยความกรุณาของคณะอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาแก่ผู้วิจัย ในการให้คำปรึกษา และแนะนำตลอดจนทำการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่เอื้ออำนวยสถานที่ในการศึกษา การทดลอง และขอขอบคุณสถานประกอบการ สำนักงานที่เอื้ออำนวยวัสดุ อาทิเช่น เถ้าชานอ้อย เศษคอนกรีต และขอขอบคุณหน่วยงาน ผู้จัดงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 ที่ได้ให้ผู้วิจัยมีโอกาสในการนำเสนอบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, “Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 6, pp. 515–524, Jul. 2007.

[2] แนวทางการเลือกสารเสถียรภาพสำหรับปรุบปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการทางเคมี ณพล อยู่บรรพต วารสารพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 23 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม 2556

[3] Baldovin, G. (1969), “The shear strength of lateritic soils” Proc. Spec.Session Eng. Properties Lateritic Soils 1, pp.129-142.

[4] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, "Utilization of bagasse ash in high-strength concrete," *Materials & Design*, vol. 34, pp. 45–50, Feb. 2012.

[5] Punurai, W., Kroehong, W., Saptamongkol, A. and Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste. Construction and Building Materials, 186, pp.62-70.

[6] Rattanasak, U and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. Minerals Engineering, 22(12), pp.1073-1078.

[7] Sung G, Bok Y, TaekK, Soo Y. "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators" Constr Build Mater.2015;47 (2013):409-418.

[8] Sahalaph Homwuttiwong, et al. " Development of a geopolymer made from bagasse ash for use as a cementitious material." Asia-Pacific Journal of Science and Technology 26 (2021):10-Jan.

[9] มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล. ม. 206/2564)