



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุพื้นทางเดิมปรับปรุงด้วยเถ้าลอย และกากแคลเซียมคาร์ไบด์จีโอโพลิเมอร์

Unconfined compressive strength development in recycled pavement base material improved by fly ash and calcium carbide residue geopolymer

เสริมศักดิ์ ตียะแสงทอง¹ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์^{1*} ปิยธิดา อยู่สุข¹ นพดล ดีเรือ²
วรวิทย์ โพธิ์จันทร์³ นาถ สุขศีล⁴

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

² กรมทางหลวงชนบท กรุงเทพฯ 10220

³ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จ.ขอนแก่น 40000

⁴ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

Sermasak Tiyasangthong¹ Cherdasak Suksiripattanapong^{1*} Piyathida Yoosuk¹ Noppadol Deeruak²
Worawit Phojan³ Nart Sooksil⁴

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

² Department of Rural Roads, Bangkok 10220

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University, Khon Kaen 40000

⁴ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom 48000

* Corresponding author.

E-mail: Cherdasak.su@rmuti.ac.th; Telephone: 081 760 7722

วันที่รับบทความ 1 กันยายน 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 11 มกราคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ 13 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนา กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุพื้นทางเดิมปรับปรุงด้วยเถ้าลอย และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารกระตุ้นซึ่งเป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์, อัตราส่วนของหินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐาน: กากแคลเซียมคาร์ไบด์: เถ้าลอย (RCR:CCR:FA) และอัตราส่วน NS:NH พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์มีค่าลดลงตามปริมาณ FA ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความถ่วงจำเพาะของ FA ต่ำกว่า กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วันมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณ FA เนื่องจากปริมาณซิลิกาและอลูมินาในระบบเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม (Optimum liquid alkaline content, OLC), อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50 และอัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 2 ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.88 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม.204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งระบุว่ากำลังอัดต้องไม่น้อยกว่า 1.724 MPa พบว่าทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนดของกรมทางหลวง นอกจากนี้ ได้นำเสนอสมการที่เป็นประโยชน์ในการทำนายกำลังอัดของวัสดุพื้นทางเดิมปรับปรุงด้วยเถ้าลอย และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จีโอโพลิเมอร์ เมื่อทราบกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน

คำสำคัญ

กำลังอัดแกนเดียว หินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐาน เถ้าลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ จีโอโพลิเมอร์

Abstract

This research investigates unconfined compressive strength development in recycled pavement base material improved by fly ash and calcium carbide residue geopolymer at curing times of 7, 14, 28, 60, and 90 days. This research studied the effect of liquid alkaline activator content comprised of sodium silicate (NS) and sodium hydroxide (NH) with NH concentration of 8 molar, the RCR:CCR:FA ratios, and the NS:NH ratios. The test result showed that the maximum dry unit weight of the RCR-CCR-FA geopolymer sample decreased as the FA increased due to the lower specific gravity of FA. The 7-day unconfined compressive strength increased as FA content increased due to the increased amount of Si and Al. Sample with optimum liquid alkaline content, RCR:CCR:FA ratio of 40:10:50 and NS:NH ratio of 2 gave the maximum unconfined compressive strength of 9.88 MPa. Based on the Department of Highways (DOH) standard, All ingredients passed the DOH standard. Furthermore, the proposed equation is beneficial for estimating the unconfined compressive strength of RCR-CCR-FA geopolymer when 28-day unconfined compressive strength was known.

Keywords

unconfined compressive strength; recycled crushed rock; fly ash; calcium carbide residue; Geopolymer

1. คำนำ

หินคลุกเป็นวัสดุธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด และสภาพแวดล้อม ในปัจจุบันวัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนและโครงสร้างคันดินระบบรางรถไฟมีจำนวนลดน้อยลงซึ่งส่งผลให้วัสดุก่อสร้างทางมีราคาสูงขึ้น ในขณะที่การซ่อมแซม ขยายถนนและโครงสร้างคันดินระบบรางรถไฟจะต้องดำเนินการต่อไป ในระหว่างการก่อสร้างถนนและโครงสร้างคันดินระบบรางรถไฟต้องมีการขนส่งวัสดุทาง เช่นหินคลุก ดินลูกรัง และดินทราย มาใช้ในงานก่อสร้าง ในบางพื้นที่วัสดุที่ผ่านมาตรฐานมีจำนวนจำกัด หรืออยู่ห่างไกลจากพื้นที่ก่อสร้างมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดสูญเสียพลังงานเชื้อเพลิงในการขนส่งวัสดุ การจราจรติดขัดและเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างถนนและสิ่งแวดล้อม จากปัญหาการขาดแคลนวัสดุธรรมชาติ ปัจจุบันได้มีการก่อสร้างชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางด้วยวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น อาทิเช่น หินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐาน ดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐาน หินผุ และปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังอัดด้วยปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ซึ่งเรียกว่า “ดินซีเมนต์” (Soil cement) โดยที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cement stabilization) ในการปรับปรุงหินคลุก และดินลูกรัง อย่างไรก็ตามการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อให้เกิด Greenhouse effect [1]

วัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้จัดเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green material) ที่ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปลดปล่อย CO₂ ต่ำ แก๊สลอยที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการผลิตไฟฟ้า แก๊สลอยมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Geopolymerization) ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์ ที่ส่งผลให้มีความแข็งแรงและความคงทนสูงขึ้น [2]

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเชื่อมโลหะ กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความเป็นด่างสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและพื้นที่ใกล้เคียง ในแต่ละปีมีปริมาณการทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานแห่งหนึ่งสูงถึง 1000 ตัน/เดือน หรือปริมาณ 12000 ตัน/ปี [3] ซึ่งไม่สามารถนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากทิ้ง บริเวณโรงงาน ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ และส่งกลิ่นเหม็น ในปี พ.ศ. 2556 มีปริมาณการทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทั่วประเทศสูงถึง 21,500 ตัน/ปี [4,5] ปัจจุบันมีการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำหินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐานปรับปรุงด้วยแก๊สลอย และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จีโอโพลิเมอร์มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุพื้นทาง โดยพิจารณาตัวแปรควบคุม ได้แก่ อัตราส่วนผสมหินคลุกไม่ผ่านมาตรฐานต่อวัสดุประสาน ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ปริมาณแก๊สลอย ปริมาณสารกระตุ้น อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และ

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) และอายุบ่ม งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างกับข้อกำหนดของกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบท งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำขยะจากภาคอุตสาหกรรม (กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย) มาทดแทนการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในงานโครงสร้างพื้นฐาน อาทิ ถนน และทางรถไฟ

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

หินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐาน (Recycled crushed rock, RCR) ได้จากโครงการงานบูรณะทางลาดยางของทางหลวงชนบท อำเภอบางมูลนาก จังหวัดพิจิตร ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแสดงในตารางที่ 1 พบว่า RCR มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.54 และเป็นวัสดุที่ไม่มีสภาพพลาสติก (Non plastic) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ปลั่งงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor compaction Test) มีค่าเท่ากับ 20.81 kN/m³ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ร้อยละ 11.48 ผลการทดสอบค่า CBR ที่ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 76.43 จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานพบว่าค่า CBR ของ RCR ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทข.203-2557 (กำหนดไว้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80) ค่าความสึกหรอ (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 34.76 การจำแนกตามระบบของ Unified Soil Classification System (USCS) เป็นกรวดปนตะกอนที่มีขนาดละเอียด (GW-GM) และหากจำแนกประเภทตามระบบ AASHTO จัดอยู่ในประเภท A-1-a

เถ้าลอย (Fly ash, FA) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มาจากแหล่ง โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง FA มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.11 องค์ประกอบทางเคมีของ FA ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธี X-ray fluorescence (XRF) พบว่าปริมาณของธาตุ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มีค่าเท่ากับร้อยละ 77.15 โดยน้ำหนัก และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 16.09

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide residue, CCR) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเก็บมาจาก

บริษัท Sai 5 Gas Product ลักษณะของ CCR มีสีเทาเข้ม CCR มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.24 คุณสมบัติทางเคมีหลักของ CCR คือแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 75.96 และมีค่า LOI ประมาณร้อยละ 4.98

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของ RCR

Item	Basic properties	DRR Standard
Specific gravity	2.54	-
Liquid limit, (%)	-	<25
Plastic limit, (%)	N.P.	-
Plastic index, (%)	-	< 6
Maximum dry unit weight, kN/m ³	20.81	-
Optimum moisture content, (%)	11.48	-
CBR at 95% of dry density, (%)	76.43	> 80
LA abrasion, (%)	34.76	< 40
Classification by USCS	GW-GM	-

สารกระตุ้น (Alkali-activator) ในการศึกษาครั้งนี้ คือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, NS) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NH) ความเข้มข้นของ NH เท่ากับ 8 โมลาร์

2.2 การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

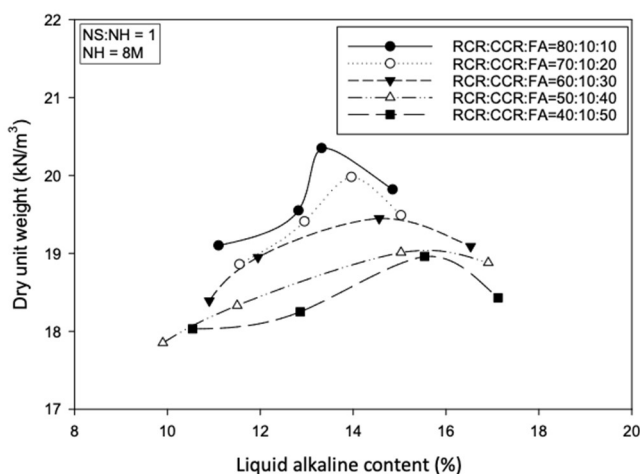
การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำ RCR มาผสมกับ FA และ CCR โดยใช้อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50, 50:10:40, 60:10:30, 70:10:20 และ 80:10:10 จากนั้นนำตัวอย่าง RCR-CCR-FA มาผสมกับสารกระตุ้นที่อัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 จากนั้นทำการทดสอบด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test) โดยจะเพิ่มปริมาณสารกระตุ้น (Liquid alkaline content; L) ในช่วงร้อยละ 10- 20

เมื่อได้ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสมแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำมาบดอัดในโมลขนาด 4 นิ้ว เพื่อทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ตัวอย่างการทดสอบจะถูกนำมาบ่มที่อุณหภูมิ (ประมาณ 28 °C) ในห้องปฏิบัติการ จนได้อายุบ่ม 7 วัน เมื่อครบกำหนดวันที่

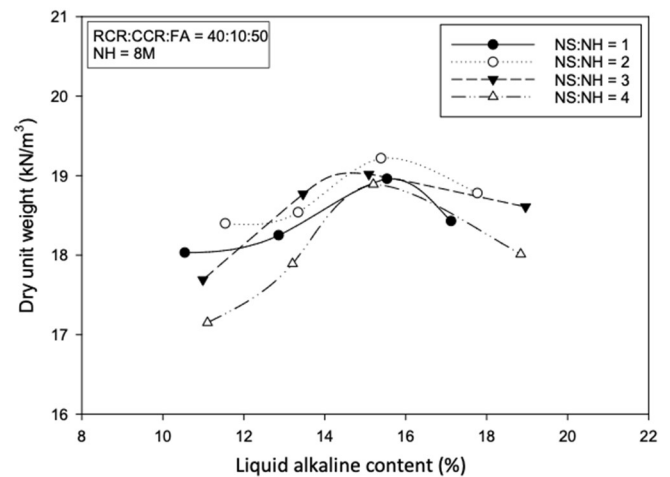
จะทดสอบแกะพลาสติกออกจากก้อนตัวอย่างแล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

3. ผลการวิจัย

รูปที่ 1 แสดงกราฟการบดอัดของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50, 50:10:40, 60:10:30, 70:10:20 และ 80:10:10, อัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 1 และความเข้มข้นของ NH เท่ากับ 8 โมลาร์ พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์มีค่าลดลงตามปริมาณ FA ที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 20.35, 19.98, 19.45, 19.01, และ 18.96 kN/m³ สำหรับปริมาณ FA ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ ปริมาณ L ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กล่าวคือ เมื่อปริมาณ L < OLC (ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม (Optimum liquid alkaline content, OLC)) หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ L เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของดินแน่นขึ้น และอัตราส่วนช่องว่างลดลง ซึ่งทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบประเกสรระกะ (Flocculated structure) ในขณะที่ปริมาณ L > OLC หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ L เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phummiphan et al., [6,7]

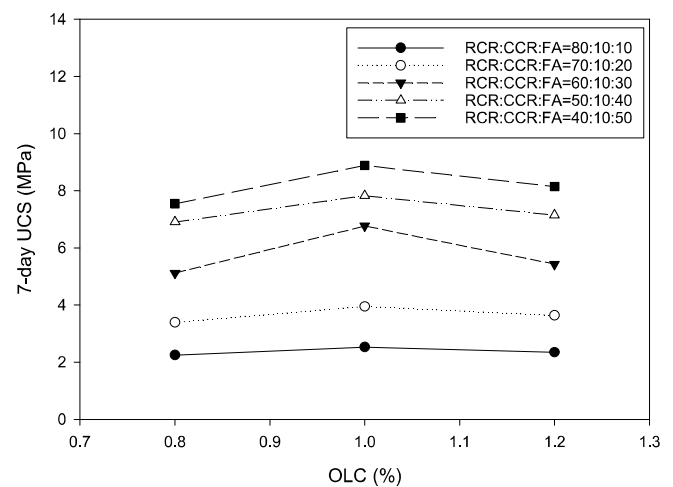


รูปที่ 1 กราฟการบดอัดของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA ต่าง ๆ



รูปที่ 2 กราฟการบดอัดของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน NS:NH ต่าง ๆ

อิทธิพลของอัตราส่วน NS:NH ต่อกราฟบดอัดของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50 แสดงในรูปที่ 2 พบว่าปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม (Optimum liquid alkaline content, OLC) ของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์มีค่าระหว่างร้อยละ 14-16 ในขณะที่ หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างมีค่าประมาณ 19 kN/m³

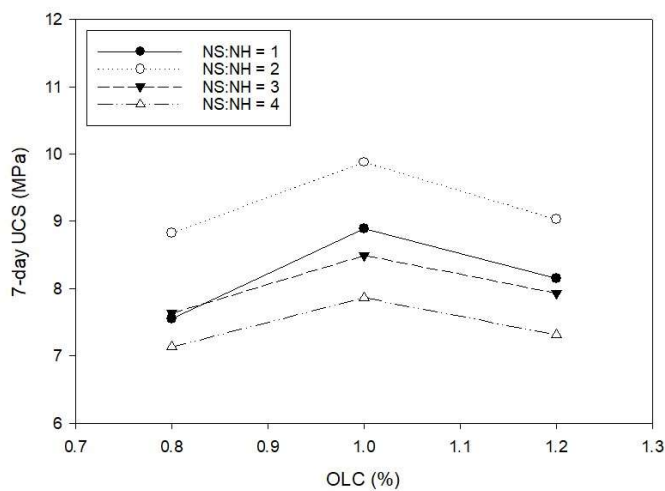


รูปที่ 3 กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน ของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA ต่าง ๆ

รูปที่ 3 แสดงกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน ของ RCR-CCR-FA จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50, 50:10:40, 60:10:30, 70:10:20 และ 80:10:10, อัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 1 และความเข้มข้นของ NH เท่ากับ

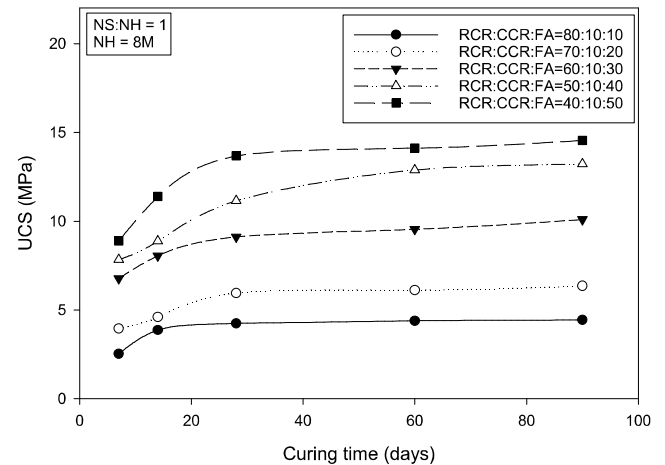
8 โมลาร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วันมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณ FA ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันของตัวอย่างที่ OLC มีค่าเท่ากับ 2.53, 3.95, 6.77, 7.83, และ 8.89 MPa สำหรับปริมาณ FA ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50 และอัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 1 มีค่าเท่ากับ 8.89 MPa เนื่องจากปริมาณซิลิกาและอลูมินาในระบบเพิ่มขึ้น และจากความเข้มข้นของ NaOH เพียงพอที่จะสามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจาก FA ออกมาได้มาก ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันได้ดี [8,9]

อิทธิพลของปริมาณสารกระตุ้น และอัตราส่วน NS:NH ต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน ของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50 แสดงในรูปที่ 4 พบว่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างที่ 0.8OLC และ 1.2OLC มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ ตัวอย่างที่ OLC ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.88 MPa สำหรับอัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 2



รูปที่ 4 กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน ของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน NS:NH ต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม.204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งระบุว่ากำลังอัดต้องไม่น้อยกว่า 1.724 MPa พบว่าทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนดของกรมทางหลวง



รูปที่ 5 การพัฒนากำลังอัดของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA ต่าง ๆ

รูปที่ 5 แสดงการพัฒนากำลังอัดของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50, 50:10:40, 60:10:30, 70:10:20 และ 80:10:10, อัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 1 และความเข้มข้นของ NH เท่ากับ 8 โมลาร์ พบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นสำหรับทุกอัตราส่วนผสม ยกตัวอย่างเช่นกำลังอัดของตัวอย่างที่ RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50 มีค่าเท่ากับ 8.89, 11.39, 13.68, 14.12 และ 14.55 MPa สำหรับระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28, 60, และ 90 วัน ตามลำดับ กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) จาก FA สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียม (CaO) จาก CCR ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่างปอซโซลานและปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันอย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS/28-d UCS กับอายุบ่มของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์ที่ทุกปริมาณวัสดุประสาน พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ทุกปริมาณวัสดุประสานสามารถหารด้วยกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ค่า UCS ของตัวอย่างที่อายุบ่มใด ๆ สามารถประมาณจากฟังก์ชันล็อกการิทึม ดังสมการที่ (1)

$$UCS / 28 - d UCS = 0.391 + 0.164 \ln(D) \quad (1)$$

เมื่อ UCS คือ กำลังอัดแกนเดียว, 28-d UCS คือกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน และ D คืออายุบ่ม โดยค่า R^2 (Coefficient of Determination) มีค่าเท่ากับ 0.874

4. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จีโอโพลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุพื้นทางเดิม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

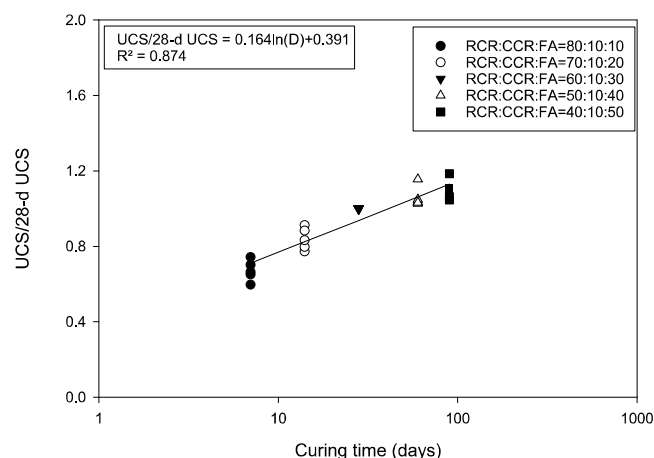
1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์มีค่าลดลงตามปริมาณ FA ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสมของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์มีค่าระหว่างร้อยละ 14-16 ซึ่งให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างมีค่าประมาณ 19-20.5 kN/m³

2. กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วันมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณ FA เนื่องจากปริมาณซิลิกาและอลูมินาในระบบเพิ่มขึ้น และจากความเข้มข้นของ NaOH ที่เพียงพอ ซึ่งทำให้สามารถละลายซิลิกาและอลูมินาจาก FA ออกมาได้มากเพื่อทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน

3. กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างที่ 0.8OLC และ 1.2OLC มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ ตัวอย่างที่ OLC , อัตราส่วน RCR:CCR:FA เท่ากับ 40:10:50, และอัตราส่วน NS:NH เท่ากับ 2 ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.88 MPa

3. เมื่อเปรียบเทียบค่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม.204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งระบุว่า กำลังอัดต้องไม่น้อยกว่า 1.724 MPa พบว่าทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนดของกรมทางหลวง

4. สมการที่นำเสนอนี้มีประโยชน์ในการทำนายกำลังอัดของวัสดุพื้นทางเดิมปรับปรุงด้วยเถ้าลอย และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จีโอโพลิเมอร์ เมื่อทราบกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS/28-d UCS กับอายุบ่มของ RCR-CCR-FA จีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน RCR:CCR:FA ต่าง ๆ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ตามสัญญาเลขที่ FRB650059/NMA/17 และผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และกรมทางหลวงชนบทที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Suksiripattanapong C, Horpibulsuk S, Boongrasan S, Udomchai A, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A. Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge- fly ash lightweight cellular geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2015;58: 254-257.
- [2] Suksiripattanapong C, Horpibulsuk S, Chanprasert P, Sukmak P, Arulrajah A. Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Construction and Building Materials*. 2015;82: 20-30.
- [3] Makaratat N, Laosamathikul T, Jaturapitakkul C. Utilization of calcium carbide residue – fly ash mixture as a cementing material in concrete. *The 33rd International Association for Bridge and Structural Engineering*. 2009;96: 144-149.

- [4] Amnadhua K. Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash. *Materials and Design*.2013;51: 894-901.
- [5] Phetchuay C, Horpibulsuk S, Arulrajah A, Suksiripattanapong C, Udomchai A. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer. *Applied Clay Science*. 2016;127-128: 134-142.
- [6] Phummiphan I, Horpibulsuk S, Sukmak P, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A, Shen SL. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash- based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*. 2016;17(4): 877-891.
- [7] Phummiphan I, Horpibulsuk S, Phoo-ngernkham T, Arulrajah A, Shen SL. Marginal Lateritic Soil Stabilized with Calcium Carbide Residue and Fly Ash Geopolymers as a Sustainable Pavement Base Material. *Materials in Civil Engineering*. 2017;29(2): 1-10.
- [8] Rattanasak U, Chindaprasirt P. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*. 2009;22: 1073-1078.
- [9] Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 2006;29(3): 224-229.