

การปรับปรุงวัสดุหินคลุกรีไซเคิลและแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลสำหรับการนำไปใช้เป็นชั้น พื้นทางของถนนแบบยืดหยุ่นด้วยจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจากเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย

Stabilization of RAP and RCR Materials for Base of Flexible Pavement Applications: Utilization of Bagasse Ash and Fly Ash Geopolymer Composite

ศตวรรษ ชัชวาลย์ (Sattawat Chatchawan)^{1*} รัตมณี นันทสาร (Ratamane Nuntasarn)**

(Received: August 26, 2024; Revised: November 8, 2024; Accepted: November 8, 2024)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงวัสดุหินคลุกรีไซเคิล (RCR) และแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย และมีการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วน เพื่อหมุนเวียนกลับไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนนแบบยืดหยุ่น ซึ่งเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและระยะเวลาในการทำงานได้ของวัสดุ ผลการวิจัยพบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อยสามารถใช้ปรับปรุงวัสดุแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ได้ และการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วนช่วยพัฒนาความแข็งแรงของวัสดุได้ดียิ่งขึ้น โดยการผสมด้วยเถ้าลอยส่งผลให้อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นและลดความต้องการสารละลายอัลคาไลน์ของวัสดุลงได้ อย่างไรก็ตาม การผสมเถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไปทำให้วัสดุเกิดความเปราะและระยะเวลาในการทำงานได้สั้นเกินไป โดยการปรับปรุงวัสดุ RCR และ RAP ที่อัตราส่วน 50:50 ด้วยจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจากเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยที่ปริมาณ 5% กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 8 โมลาร์ โดยการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเถ้าลอยอยู่ในช่วง 31.5% ถึง 40% เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

ABSTRACT

This paper aims to study the improvement of recycled crush rock (RCR) and recycled asphalt pavement (RAP) aggregates with bagasse ash (BA) and fly ash (FA) geopolymer for base of flexible pavement material. The objective is to conserve natural resources and minimize waste. This research focused on the mechanical properties and workability time for compaction of stabilized material. The results indicated that a BA geopolymer enhanced the strength of compacted RCR and RAP. Further improvement of these materials was achieved by partially replacing BA with FA, leading to a reduced demand for alkali solution and increased density. Adding FA to the mixture improved the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio in the system, resulting in improved strength of materials. However, excessive FA led to brittleness and reduced workability time. A 50:50 mix of RCR and RAP with geopolymer (BA and FA, 5% total ash, FA 31.5% to 40% of total ash), mixed with sodium silicate and 8 M NaOH, is recommended.

คำสำคัญ: วัสดุจากการรีไซเคิลก่อสร้าง จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย ชั้นพื้นทาง

Keywords: C&D materials, Bagasse ash geopolymers, Base of flexible pavement

¹Corresponding author: sattawatc@kkumail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Student, Doctor of Philosophy Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

บทนำ

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP) และหินคลุกจากชั้นพื้นทางเดิม รีไซเคิล (Recycled crush rock, RCR) จัดอยู่ในประเภทวัสดุจากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง (Construction & Demolition, C&D) ซึ่งเป็นวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและคุ้มค่าสำหรับใช้เป็นวัสดุโครงสร้างถนนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้มวลรวมใหม่จากแหล่งธรรมชาติ แต่การนำวัสดุเหล่านี้หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ หากไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ วัสดุที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ [1-5] โดยการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง มักจะปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งไม่ใช่วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มีส่วนทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 7% ต่อปี [6] ด้วยเหตุนี้ ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาวัสดุพอลิซิลิโคนชนิดใหม่ที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม โดยมีคุณสมบัติในการยึดประสานเทียบเท่าปูนซีเมนต์ ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) เป็นผลพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลในโรงงานน้ำตาล และยังมีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้น้อยมาก หลงเหลือเป็นวัสดุเหลือทิ้งและเกิดปัญหาในการกำจัด ซึ่งเถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้ [7-8]

อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย ซึ่งเป็นเถ้าชีวมวล มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) ปริมาณมาก แต่มีอะลูมินา (Al_2O_3) ต่ำ โดยเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลขอนแก่นมีองค์ประกอบของซิลิกาสูงถึง 89.11% และมีอะลูมินาเพียง 0.67% [9] ซึ่งองค์ประกอบของซิลิกาเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากนัก [10] โดยสารตั้งต้นลักษณะนี้จะได้ซิลิกาเจลเป็นผลิตภัณฑ์หลักและมีการประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Si-O-Al-O) เกิดขึ้นน้อยมาก โดยจะส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุและส่งผลให้วัสดุไม่มีความคงตัวในสภาวะเปียก [11-12] ซึ่งอาจไม่เหมาะต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนนมากนัก

การเพิ่มเถ้าลอยลงไปในส่วนผสมสามารถเพิ่มแหล่งอะลูมินา (Al_2O_3) ในระบบได้ ซึ่งเป็นการช่วยปรับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น นำไปสู่การพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุได้ [10, 13-16]

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุหมุนเวียน (C&D) ซึ่งได้แก่ RCR และ RAP สำหรับนำกลับไปใช้ใหม่เป็นชั้นพื้นทางของถนนแบบยืดหยุ่น โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย และมีการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเพิ่มเติมโดยการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วน โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านความหนาแน่น กำลังรับแรงอัดแกนเดียว และระยะเวลาในการบดอัดได้ของวัสดุ

วิธีวิจัย

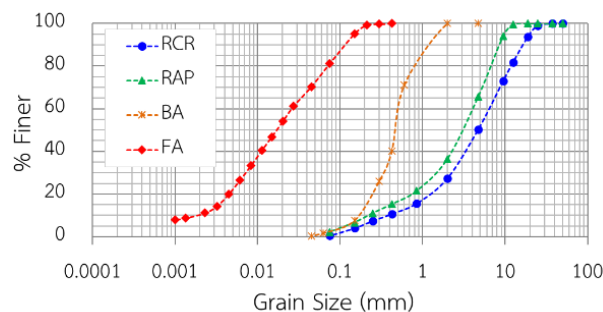
1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1.1 มวลรวม

หินคลุกรีไซเคิล (Recycled crush rock, RCR) และแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP) ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้มาจากการรื้อถอนถนนที่เสื่อมสภาพในพื้นที่ จ.ขอนแก่น โดยวัสดุเหล่านี้จะถูกบดย่อยเป็นมวลรวมให้ได้ขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดสอบการกระจายขนาดผลของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM C136-06 ดังแสดงในภาพที่ 1 พบว่ามวลรวม RAP มีค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of curvature, C_c) เท่ากับ 2.37 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of uniformity, C_u) เท่ากับ 14.81 ส่วนมวลรวม RCR มีค่า C_c

เท่ากับ 2.27 และ C_u เท่ากับ 17.43 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลรวมทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นวัสดุที่มีขนาดคละกัณฑ์ (Well graded) และสามารถจำแนกได้เป็นมวลรวมประเภท SW ตามระบบ USCS และ A-1-a ตามระบบ AASHTO

จากการทดสอบความคงทนต่อการขัดสี ตามมาตรฐาน ASTM C131/C131M-20 พบว่ามวลรวม RAP และ RCR มีค่าเปอร์เซ็นต์การสึกหรอ เท่ากับ 21.07% และ 29.39% ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, G_s) และค่าการดูดซึมน้ำจากการทดสอบตาม ASTM C127-15 พบว่ามวลรวม RAP มีค่า G_s เท่ากับ 2.45 และมีค่าการดูดซึมน้ำ 0.82% ในขณะที่มวลรวม RCR มีค่า G_s เท่ากับ 2.63 และมีค่าการดูดซึมน้ำ 2.29% โดยมวลรวม RAP มีค่า G_s และค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำเนื่องจากมวลรวม RAP ถูกเคลือบด้วยปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ จากการทดสอบขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบิร์ก (ตาม ASTM D4318-17e1) ยังพบว่า วัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่มีความเป็นพลาสติก (Non-plastic) ซึ่งจากคุณสมบัติพื้นฐานด้านต่างๆดังที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่ามวลรวม RCR และ RAP ที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานวัสดุมวลรวมสำหรับใช้เป็นชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 203/2556)



ภาพที่ 1 การกระจายขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1.2 เถ้าขานอ้อย (Bagasse ash, BA)

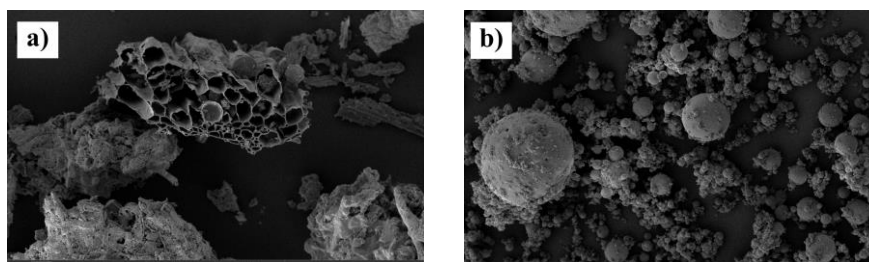
เถ้าขานอ้อยที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลน้ำพอง จ.ขอนแก่น และเป็นเถ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการบดย่อย โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) ประมาณ 450 ไมครอน จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) พบว่า มีรูปร่างไม่แน่นอนและเป็นโครงสร้างที่มีรูพรอง ดังแสดงในภาพที่ 2(a) มีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.15 และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการตรวจวัดการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence, XRF) พบว่า เถ้าขานอ้อยมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) ในปริมาณสูงและมีอะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณต่ำ คือ 72.75 และ 2.02% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยจากการทดสอบ XRF

องค์ประกอบทางเคมี		เถ้าขานอ้อย (%)	เถ้าลอย (%)
แคลเซียมออกไซด์	CaO	1.17	15.40
ซิลิกอนไดออกไซด์	SiO_2	72.75	40.80
อะลูมิเนียมออกไซด์	Al_2O_3	2.02	21.90
เหล็กออกไซด์	Fe_2O_3	1.13	12.70
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	SO_3	0.32	0.35
โพแทสเซียมออกไซด์	K_2O	2.14	2.51
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	LOI	17.93	0.70

1.3 เถ้าลอย (Fly ash, FA)

เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเถ้าลอยแม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการตรวจวัดการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence, XRF) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 75.4\%$ ด้านขนาดของอนุภาค พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ค่าตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณ 30% จึงสามารถจำแนกได้เป็นเถ้าลอยคลาส F ตามมาตรฐาน ASTM C618 โดยมีขนาดเฉลี่ย (D_{50}) ประมาณ 16.5 ไมครอน มีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.62 อีกทั้งพบว่าเถ้าลอยในงานวิจัยนี้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 15.4% ลักษณะรูปร่างจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอีมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) พบว่า เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ดังแสดงในภาพที่ 2(b)



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางจุลภาคจากการทดสอบ FE-SEM ของ a) เถ้าขานอ้อย และ b) เถ้าลอย

1.4 สารละลายอัลคาไลน์ (Alkali activators)

สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เกรดอุตสาหกรรม ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Na}_2\text{O} = 13.44\%$, $\text{SiO}_2 = 32.39\%$ และ $\text{H}_2\text{O} = 54.17\%$ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 8, 10 และ 12 โมลาร์ โดยสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1 : 1

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 อัตราส่วนผสม

สำหรับการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานใช้อัตราส่วนผสมรวม RAP:RCR เท่ากับ 50:50 และปริมาณเถ้าขานอ้อย 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม (OLC) สำหรับใช้เตรียมตัวอย่างในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว โดยมีการทดสอบที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ทั้งฝั่งเปียกและฝั่งแห้งของกราฟการบดอัด คือที่ OLC, OLC-3%, และ OLC+3% ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยทุกตัวอย่างจะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาบ่ม 7 วัน และแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชม. ก่อนทำการทดสอบ (ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2556)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

มวลรวม (RAP : RCR)	เถ้าขานอ้อย (% โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ปริมาณสารละลาย อัลคาไลน์
50 : 50	0, 5, 10, และ 15	8, 10, และ 12	OLC-3%
			OLC
			OLC+3%

2.2 ขั้นตอนการผสม

การผสมวัสดุในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องผสมวัสดุที่ความเร็วในการปั่น 54 รอบต่อนาที โดยขั้นตอนการผสมเริ่มจากการปั่นผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเติมวัสดุมวลรวมและปั่นผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นทำการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และปั่นผสมต่อไปอีก 2 นาที

3. ขั้นตอนการทดสอบ

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในนำวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีต รีไซเคิลและหินคลุกรีไซเคิล หมุนเวียนกลับไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนน โดยทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยซึ่งกระตุ้นปฏิกิริยาดังสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ($\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$) โดยมุ่งเน้นไปที่การประเมินคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดโดยใช้มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 203/2556; $\text{UCS} > 2,413 \text{ kPa}$) เป็นเกณฑ์ และส่วนที่ 2 เป็นการคัดเลือกอัตราส่วนผสมจากส่วนที่ 1 ที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ทล.-ม. 203/2556 นำไปศึกษาการพัฒนา กำลังรับแรงอัดโดยการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีโดยการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วน ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ในระบบเพื่อปรับสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น

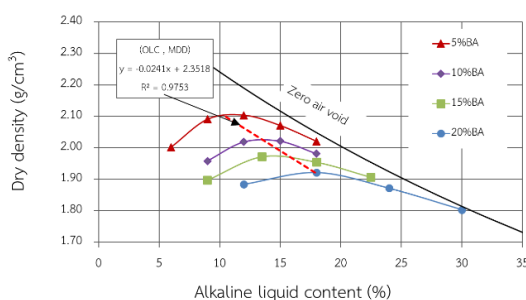
ขั้นตอนการทดสอบ เริ่มต้นด้วยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ขนาดคละ (ASTM C136-06) ชีตจำกัดของอัตราเปอร์เซ็นต์ (ASTM D4318-17e1) ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (ASTM C127-15) และความคงทนต่อการขัดสี (ASTM C131/C131M-20) หลังจากนั้นทำการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557-12) การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (ASTM D2166-06) และการทดสอบหาระยะเวลาในการบดอัดได้ (ใช้มาตรฐาน ASTM D1557-12 เพื่อหาระยะเวลาหลังการผสมที่ทำให้วัสดุเริ่มมีความหนาแน่นลดลงอย่างรวดเร็ว)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการปรับปรุงวัสดุหมุนเวียนด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย

1.1 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม

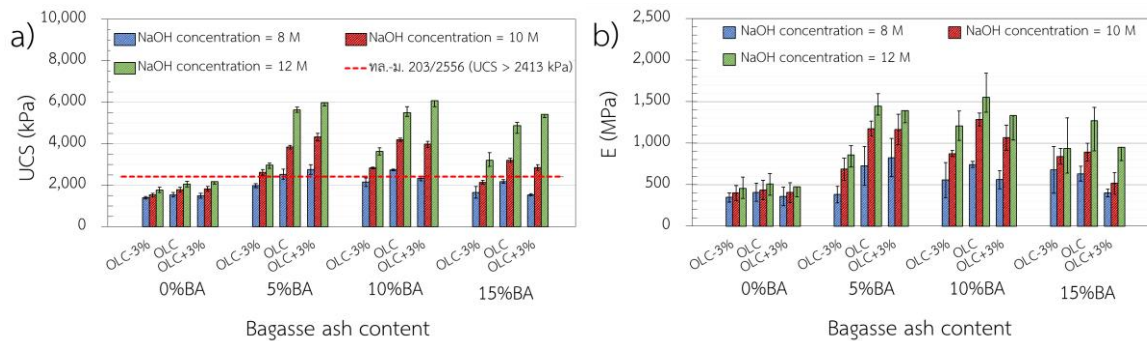
ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน พบว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, MDD) ของวัสดุ จะลดลงตามปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ C&D ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [17] และยังพบว่าปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม (Optimum alkaline liquid content, OLC) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าขานอ้อย เนื่องจากโครงสร้างอนุภาคของเถ้าขานอ้อยมีรูพรุนสูง ดังแสดงในภาพที่ 2(a) ส่งผลให้มีการต้องการของเหลวเพื่อช่วยในการบดอัดที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ [18]



ภาพที่ 3 กราฟการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของมวลรวม RCR+RAP ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย

1.2 ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, UCS) และโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) ของวัสดุผสมรวมที่ผสมกับเถ้าขานอ้อยมีค่าสูงกว่าวัสดุที่ไม่ผสมด้วยเถ้าขานอ้อยอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าเถ้าขานอ้อยสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ได้ โดยปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสม คือ 5% โดยน้ำหนัก เนื่องจากหากปริมาณเถ้าขานอ้อยในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเป็น 10% และ 15% ค่าความหนาแน่นของวัสดุจะต่ำลงและส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง



ภาพที่ 4 a) UCS และ b) E ของมวลรวม RCR+RAP ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย

ภาพที่ 4(a) แสดงให้เห็นว่า วัสดุตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 และ 12 โมลาร์ ที่ปริมาณเถ้าขานอ้อย 5, 10 และ 15% เกือบทั้งหมดมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงกว่า 2,413 kPa (ทล.ม. 203/2556) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ เท่ากับ OLC และ OLC+3% ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะสูงกว่าวัสดุที่ใช้ปริมาณสารละลาย OLC-3% ส่วนวัสดุตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ และบดอัดที่ OLC-3% ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะไม่เป็นไปตามข้อกำหนดนี้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าของเหลวในระบบที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันร่วมกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารละลายและปริมาณเถ้าขานอ้อยเดียวกัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4(a) โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการชะลิกลาและอะลูมินาออกจากพื้นผิวของเถ้า ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันและการพัฒนากำลังของวัสดุ [19-20] อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงอาจส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการทำงานได้ให้สั้นลง [21-22]

จากผลการทดสอบที่ได้นี้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุมวลรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์จากการศึกษาในอดีต เพื่อประเมินศักยภาพของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งพบว่า มวลรวมรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยเถ้าขานอ้อย 5% และบดอัดที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์เท่ากับค่า OLC และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ จากงานวิจัยนี้ มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 2,531.37 kPa ซึ่งเทียบเคียงได้กับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของมวลรวม RAP ผสม RCR ในสัดส่วน 40:60 ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ประมาณ 7.2% จากงานวิจัยของ [23] และใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ [24] ที่พบว่า มวลรวม RAP ผสมดินลูกรัง (LS) ในสัดส่วน 50:50 ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 3-5% โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวประมาณ 2,300-3,000 kPa ที่อายุการบ่ม 7 วันเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในการปรับปรุงมวลรวมรีไซเคิลเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์

1.3 การคัดเลือกอัตราส่วนผสมที่น่าสนใจไปทำการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผู้วิจัยได้เลือกส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าขาน้อย 5% บดอัดที่ปริมาณสารละลายอัลคาร์ไลน์ OLC-3% และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8 โมลาร์ สำหรับการนำไปศึกษาการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอย 20%, 40% และ 60% โดยน้ำหนักของเถ้าขาน้อย เนื่องจากอัตราส่วนผสมนี้มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 1,979.17 kPa ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2556 และเป็นอัตราส่วนผสมที่ใช้สารละลายอัลคาร์ไลน์ในปริมาณน้อยที่สุดและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำที่สุดในการศึกษานี้ ซึ่งจะเป็นผลดีในแง่ของราคาค้นทุนและปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

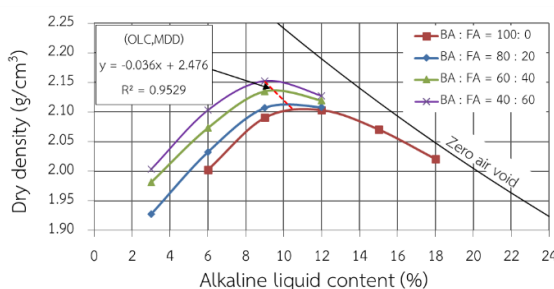
2. ผลการปรับปรุงวัสดุหมุนเวียนด้วยจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจากเถ้าขาน้อยและเถ้าลอย

2.1 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณสารละลายอัลคาร์ไลน์ที่เหมาะสม

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน พบว่า การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยส่งผลให้วัสดุมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและปริมาณสารละลายอัลคาร์ไลน์ที่เหมาะสมลดลง ดังแสดงในภาพที่ 5

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอีมิชชัน (FE-SEM) ของเถ้าขาน้อยและเถ้าลอย พบว่า วัสดุดิบทั้ง 2 ชนิดนี้มีลักษณะรูปร่างทางกายภาพที่มีความแตกต่างกันอย่างมาก โดยเถ้าลอยจะมีลักษณะกลมและทึบดังแสดงในภาพที่ 2(b) ส่วนเถ้าขาน้อยมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระและมีรูพรุนสูง ดังแสดงในภาพที่ 2(a) ส่งผลให้ตัวอย่างที่มีสัดส่วนของเถ้าขาน้อยในปริมาณสูงจะมีความต้องการสารละลายในปริมาณมากกว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนของเถ้าลอยสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ [25-26] ที่พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นช่วยลดปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในวัสดุ

ในด้านความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม เนื่องจาก เถ้าลอยที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.62 ซึ่งสูงกว่าเถ้าขาน้อยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.15 และขนาดเฉลี่ยของเถ้าขาน้อยอยู่ที่ประมาณ 450 ไมครอน ส่วนเถ้าลอยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 16.5 ไมครอน ประกอบกับความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพของเถ้าทั้ง 2 ชนิดนี้ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้เถ้าลอยสามารถแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างมวลรวมละเอียด ประกอบกับลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยที่มีลักษณะกลมและทึบอาจช่วยส่งเสริมการไหลภายในเนื้อวัสดุได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [26]



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน BA : FA กับค่าความหนาแน่นและปริมาณสารละลายอัลคาร์ไลน์

2.2 ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุคัดเลือกที่ถูกปรับปรุงเพิ่มเติมโดยการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วน (FA replacement) ที่ปริมาณ 0 ถึง 60% โดยน้ำหนักของเถ้าทั้งหมด (BA+FA = 5% โดยน้ำหนักของมวลรวม) พบว่า กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, UCS) และโมดูลัสยืดหยุ่น

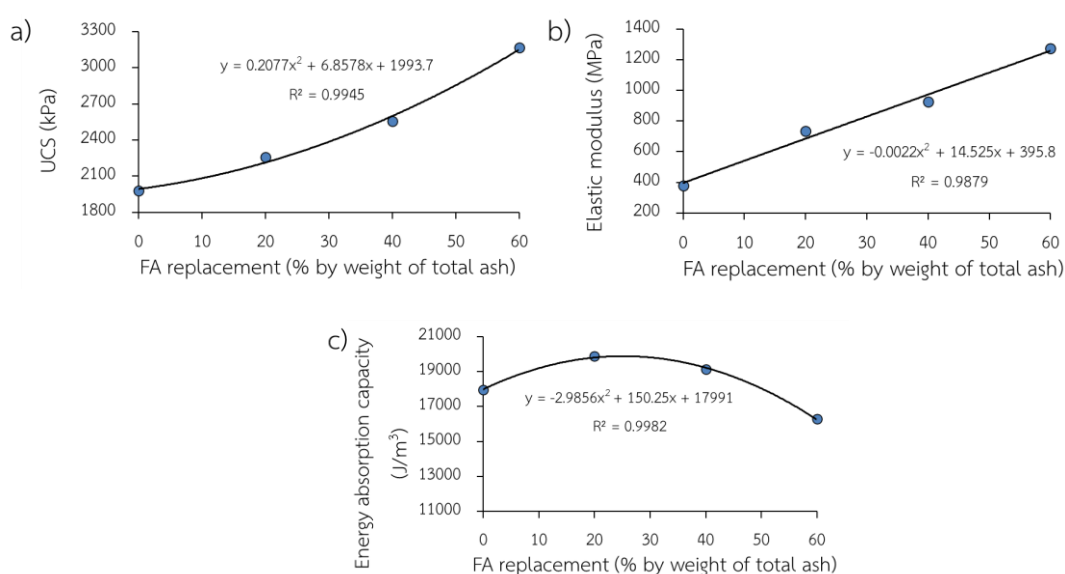
(Elastic modulus, E) ของวัสดุ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยพบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ 40 และ 60% วัสดุจะมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ทล.ม. 203/2556 โดยมีค่าเท่ากับ 2,556.68 kPa และ 3,167.56 kPa เกิดการพัฒนา กำลังเพิ่มขึ้น 29.18 และ 60.05% ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของการศึกษานี้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยเถ้าลอย พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบสมการกำลังสอง ดังแสดงในภาพที่ 6(a) และสมการที่ (1) และจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะได้ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยเถ้าลอยที่ทำให้วัสดุคัดเลือกมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำตามมาตรฐาน ทล.ม. 203/2556 ($UCS > 2,413$ kPa) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31.5% โดยน้ำหนักของเถ้าทั้งหมด ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแสดงความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยเถ้าลอยเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 6(b)

$$UCS = 0.2077(FA\ replacement)^2 + 6.8578(FA\ replacement) + 1993.7 \quad (1)$$

เมื่อ UCS คือ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุ มีหน่วยเป็น kPa

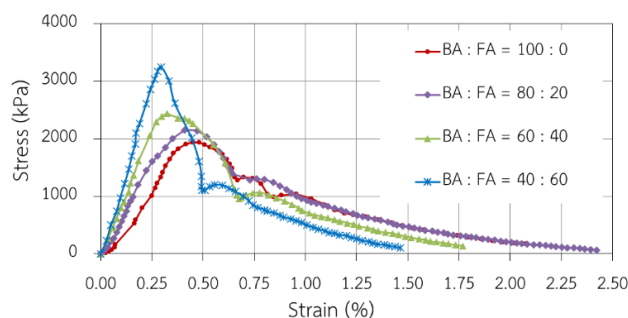
FA replacement คือ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยเถ้าลอย มีหน่วยเป็น % ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

จากผลการทดสอบนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ [27] ที่ได้ศึกษาการปรับปรุงมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว โดยใช้สัดส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิลิเกต ($NaOH : Na_2SiO_3$) ที่ 1:1 และบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันเช่นเดียวกัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากชนิดและปริมาณของสารผสมเพิ่มที่ใช้แตกต่างกัน กล่าวคือ ในงานวิจัยของ [27] ใช้เถ้าลอย 20% โดยน้ำหนักมวลรวม และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงกว่า (10 โมลาร์) ปัจจัยทั้งสองนี้มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการใช้เถ้าลอยผสมเถ้าลอยในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียวในแง่ของการพัฒนา กำลังรับแรงอัด แต่การใช้เถ้าลอยที่มากเกินไปก็อาจส่งผลให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบแข็งแต่เปราะรวมถึงระยะเวลาในการบดอัดที่สั้นเกินไปได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนนแบบยืดหยุ่น โดยงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญกับประเด็นต่างๆ เหล่านี้ ดังที่แสดงไว้ในข้อหาดังกล่าว



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง FA replacement กับ a) UCS, b) Elastic modulus และ c) Energy absorption capacity

ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption capacity, E_A) ของวัสดุในงานวิจัยนี้ ได้จากผลการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของกราฟความเค้น-ความเครียด และเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอย (FA replacement) กับค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 6(c) พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานไม่ได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอย โดยการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอยที่ 20% มีค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงที่สุด เนื่องจากเถ้าลอยช่วยให้วัสดุมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นแต่ในขณะเดียวกันวัสดุจะมีความเปราะมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้เมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอยมากขึ้นถึงระดับหนึ่ง พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุหลังจตุวิบัติจะลดลงโดยแปรผกผันกับปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอย ซึ่งแสดงถึงความเปราะของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟความเค้น-ความเครียด ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจากเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอย

ปัจจัยที่ทำให้การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอยมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุในด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียว โมดูลัสยืดหยุ่นและความสามารถในการดูดซับพลังงาน มาจากหลายปัจจัยทั้งทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้

1) ความหนาแน่นของวัสดุที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอย จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เป็นปัจจัยทางกายภาพประการหนึ่งที่มีส่วนทำให้ทั้งกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

2) การเพิ่มเถ้าลอยในอัตราส่วนผสมเป็นปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีในระบบ เนื่องจากแหล่ง Al_2O_3 ในเถ้าลอยจะช่วยปรับอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ให้เข้าใกล้ช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ที่ดีที่สุดมักอยู่ในช่วง 1-3 ซึ่งจะก่อให้เกิดจีโอโพลิเมอร์โครงสร้าง 3 มิติ และสามารถรับกำลังอัดได้ดี [28] จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 กับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 8(a) แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ต่ำกว่า 14.85 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว ในทางกลับกันอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ที่สูง วัสดุจะแสดงพฤติกรรมแบบความยืดหยุ่นสูง พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ [29] ที่พบว่าหากอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ในระบบของจีโอโพลิเมอร์มากกว่า 15.9 กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลงและจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้นแทนสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12] และด้วยเหตุนี้ ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (E_A) ของวัสดุในงานวิจัยนี้จึงไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเถ้าลอย

3) เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 15.4% จัดได้ว่าเป็นเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของแคลเซียม (Ca) ค่อนข้างสูง และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) ดังแสดงในภาพที่ 9 พบองค์ประกอบของแคลเซียม

กระจายตัวอยู่ในเนื้อจีโอโพลิเมอร์เมริกของวัสดุที่ปรับปรุงโดยการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วน ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 8(b) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [30] เนื่องจากการใช้เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมที่สูงในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ นอกจากจะได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันแล้ว ยังเกิดปฏิกิริยาคู่ (double reaction) กับปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เช่นเดียวกับคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในเถ้าลอยจะถูกละลายโดยน้ำ (H₂O) ได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca²⁺) ดังแสดงในสมการที่ (2) หลังจากนั้นจะเกิดการตกตะกอนระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca²⁺) กับซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะละลายออกมาจากผิวของเถ้าลอย โดยสารละลายอัลคาไลน์ ดังแสดงในสมการที่ (3) ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือ แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ดังแสดงในสมการที่ (4) [15] ทำให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมสูงภายใต้สภาวะต่าง สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่อุณหภูมิห้อง [31-32]

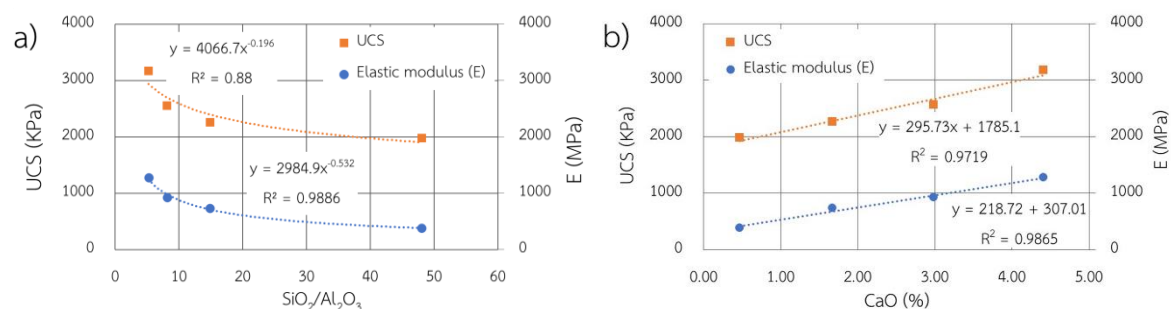
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตามอัตราส่วนผสม

FA replacement (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
0	38.82	0.81	0.47	48.04
20	37.10	2.50	1.67	14.85
40	35.23	4.34	2.98	8.13
60	33.19	6.34	4.41	5.23

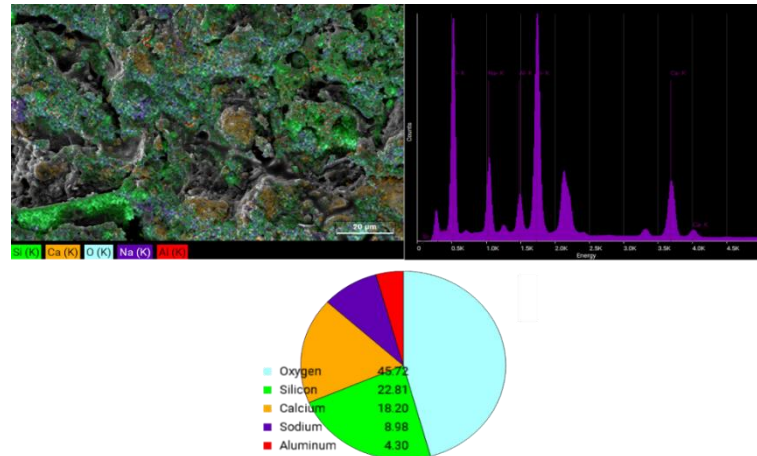
I) การชะละลายของแหล่ง SiO₂, Al₂O₃ และแคลเซียม



II) ปฏิกิริยาการตกตะกอน



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และ E กับ a) SiO₂/Al₂O₃ และ b) CaO



ภาพที่ 9 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วย EDS ของวัสดุที่มีอัตราส่วน BA : FA เท่ากับ 80 : 20

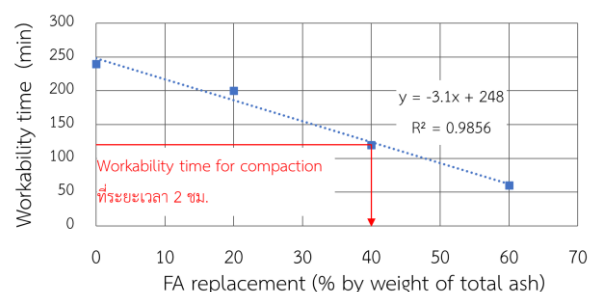
2.3 ระยะเวลาในการบดอัดได้ (The workability time for the compaction)

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตามระยะเวลาหลังผสม พบว่า ระยะเวลาในการบดอัดได้ของวัสดุจะสั้นลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 10 เนื่องจาก

1) เถ้าขาน้อยเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งอาจมีน้ำตาลซูโครสหลงเหลืออยู่ โดยน้ำตาลซูโครสอาจหน่วงระยะเวลาการก่อตัวของอิโพลิเมอร์ได้เช่นเดียวกับกรณีของปูนซีเมนต์ เนื่องจากน้ำตาลซูโครสจะลดปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยา (Heat of reaction) ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาอิโพลิเมอร์ไรเซชัน [33] สอดคล้องกับงานวิจัยของ [34] ที่พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมด้วยเถ้าขาน้อยบางส่วนทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุเพิ่มขึ้น

2) อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีอิทธิพลต่อกระบวนการก่อตัวของวัสดุอิโพลิเมอร์ โดยองค์ประกอบ Si/Al ที่สูงในเถ้าชีวมวล มีนัยสำคัญต่อระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุ [15, 35-36] เนื่องจากอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงขึ้นในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง ส่งผลให้มีซิลิเกตที่สามารถพัฒนาเป็นซิลิเกตโอลิโกเมอร์ได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งกระบวนการควบแน่นจะใช้เวลานานขึ้นเพื่อสร้างโครงข่ายอิโพลิเมอร์ ทำให้กระบวนการก่อตัวเกิดความล่าช้า [15] ในทางกลับกัน การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยทำให้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในระบบต่ำลง จึงส่งผลให้กระบวนการควบแน่นและสร้างเป็นโครงข่ายอิโพลิเมอร์ได้ง่ายขึ้น วัสดุจึงเกิดการก่อตัวที่รวดเร็ว ส่งผลให้ระยะเวลาในการบดอัดได้สั้นลง

3) เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบของแคลเซียมค่อนข้างสูง ($\text{CaO} = 15.4\%$) จึงมีโอกาสเกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งมีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการก่อตัวต้นของวัสดุให้สั้นลงเช่นเดียวกัน [15, 30]



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและระยะเวลาในการบดอัดได้

การบดอัดวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ในปัจจุบัน จะมีการแบ่งหน่วยพื้นที่ในการบดอัดวัสดุให้แล้วเสร็จภายใน 2 ชั่วโมง ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2556 และเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ จากความสัมพันธ์

ระหว่างปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและระยะเวลาในการบดอัดที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 10 พบว่าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จะมีค่าประมาณ 40% ซึ่งเป็นปริมาณการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยที่มากที่สุดที่สามารถบดอัดวัสดุให้แล้วเสร็จที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วไม่ส่งผลกระทบทางลบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และหินคลุกรีไซเคิล (RCR) ด้วยจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจากเถ้าขาน้อยและเถ้าลอย สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนนแบบยืดหยุ่น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) วัสดุตัวอย่างที่มีการปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากขาน้อยเพียงอย่างเดียว โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 10 และ 12 โมลาร์ ส่งผลให้วัสดุมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) สูงกว่า 2,413 kPa ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 203/2556) ส่วนวัสดุตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ ที่ปริมาณสารละลาย OLC-3% ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานนี้ และพบว่าปริมาณเถ้าขาน้อยที่เหมาะสมที่สุดคือ 5% โดยน้ำหนักมวลรวม

2) อัตราส่วนผสมที่ใช้ปริมาณสารละลายอัลคาร์ไลน์ที่ OLC-3% และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ เป็นอัตราส่วนผสมที่สนใจในการนำไปปรับปรุงเพิ่มเติมโดยการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วน เนื่องจากยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ทล.-ม.203/2556 อีกทั้งยังเป็นอัตราส่วนผสมที่ใช้ปริมาณสารละลายในปริมาณต่ำและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3) การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วนช่วยปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยช่วยลดอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) และเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในระบบ ซึ่งช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันควบคู่กับปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงช่วยเพิ่มผลิตภัณฑ์อะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้วัสดุเกิดการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยที่มากเกินไปส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานลดลงเนื่องจากวัสดุแสดงพฤติกรรมความเปราะมากขึ้นและยังส่งผลให้ระยะเวลาในการบดอัดได้สั้นลง โดยปริมาณการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 31.5 - 40% โดยน้ำหนักของเถ้าทั้งหมด จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุคัดเลือกผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ทล.-ม. 203/2556 โดยวัสดุยังไม่แสดงพฤติกรรมความเปราะมากนัก รวมถึงระยะเวลาในการบดอัดได้ไม่สั้นเกินไป

4) การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอยบางส่วนยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุจากทางกายภาพได้ โดยส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มขึ้นและความต้องการสารละลายอัลคาร์ไลน์ในการบดอัดลดลง เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก ลักษณะกลมทึบ และมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าเถ้าขาน้อย

5) การใช้วัสดุมวลรวม RCR ผสม RAP ในอัตราส่วน 50 : 50 ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจากเถ้าขาน้อยผสมเถ้าลอย 5% โดยแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเถ้าลอย 31.5% โดยน้ำหนักของเถ้าทั้งหมด กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายอัลคาร์ไลน์ที่ OLC-3% และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8 โมลาร์ เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว เท่ากับ 2,413 kPa ซึ่งผ่านเกณฑ์กำลังรับแรงอัดแกนเดียวขั้นต่ำตามมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2556 โดยต้องทำการบดอัดให้แล้วเสร็จภายใน 120 นาที/หน่วยพื้นที่ ในการนำไปก่อสร้างจริง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ “การสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์” มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Akinwumi II. Plasticity, strength and permeability of reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends. *Int J Sci Eng Res.* 2014;5(6):631–6.
2. Ansori M, Radam IF. The use of reclaimed asphalt pavement as a foundation for pavements based on the Indonesian national standard. *Int J Eng Res Appl.* 2015;15(2):14–8.
3. Poon CS, Chan D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Constr Build Mater.* 2006;20(8):578–85.
4. Arulrajah A, Piratheepan J, Disfani MM. Reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate blends in pavement subbases: laboratory and field evaluation. *J Mater Civ Eng.* 2013;26(2):349–57.
5. Zhang Z, Shen B, Ren H, Wang J, Li S, Liu H. The variability and evaluation method of recycled concrete aggregate properties. *Adv Mater Sci Eng.* 2017;2017(1):1–9.
6. Miller SA, Habert G, Myers RJ, Harvey JT. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth.* 2021;4(10):1398–411.
7. Magar JR, Acharya IP. Soft soil stabilization with alkali activated sugarcane bagasse ash. *Int J Civ Struct Eng Res.* 2019;6(2):65–73.
8. Saloma, Hanafiah, Pratiwi KI. Effect NaOH concentration on bagasse ash based geopolymerization. In: *MATEC Web Conf.* 2016;78:1–5.
9. Pitikhunpongsuk T, Prawerathang S. Potential uses of cement-mixed sugar cane bagasse ash in substitution materials for road construction works. *Eng J Res Dev.* 2020;31(2):93–103. Thai.
10. Hawa A. Strength and microstructural of geopolymer mortar from palm oil ash containing alumina powder with palm oil clinker aggregate. *Eng Appl Sci Res.* 2022;49(6):731–43.
11. Rattanasak U, Chindaprasirt P, Suwanvitaya P. Development of high volume rice husk ash aluminosilicate composites. *Int J Miner Metall Mater.* 2010;17:654–9.
12. Songpiriyakij S, Kubprasit T, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer. *Constr Build Mater.* 2010;24(3):236–40.
13. De Silva P, Sagoe-Crenstil K, Sirivivatnanon V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cem Concr Res.* 2007;37(4):512–8.
14. De Silva P, Sagoe-Crenstil K. Medium-term phase stability of Na₂O–Al₂O₃–SiO₂–H₂O geopolymer systems. *Cem Concr Res.* 2008;38(6):870–6.
15. Chindaprasirt P, De Silva P, Sagoe-Crenstil K, Hanjitsuwan S. Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *J Mater Sci.* 2012;47:4876–83.
16. Nazari A, Sanjayan JG. Synthesis of geopolymer from industrial wastes. *J Clean Prod.* 2015;99:297–304.

17. Ochebo J. Stabilization of laterite soil using reclaimed asphalt pavement and sugarcane bagasse ash for pavement construction. *J Eng Res.* 2014;4(2):1–13.
18. Osinubi KJ, Bafyau V, Eberemu AO. Bagasse ash stabilization of lateritic soil. In: *Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing World*. Ghana: Springer; 2009. p. 271–80.
19. Rattanasak U, Chindaprasirt P. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng.* 2009;22(12):1073–8.
20. Chindaprasirt P, Chalee W. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Constr Build Mater.* 2014;63:303–10.
21. Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cem Concr Compos.* 2007;29(3):224–9.
22. Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DM, Rangan BV. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Mater J.* 2004;101(6):467–72.
23. Kampala A, Suebsuk J, Daprom P, Arngbunta A, Chindaprasirt P. Strength characteristics and mix design of full-depth reclamation of asphalt pavement with cement. *Constr Build Mater.* 2024;438:136901.
24. Suebsuk J, Horpibulsuk S, Suksan A, Suksiripattanapong C, Phoo-ngernkham T, Arulrajah A. Strength prediction of cement-stabilised reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends. *Int J Pavement Eng.* 2019;20(3):332–8.
25. Mohammadinia A, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Chinkulkijniwat A. Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. *J Hazard Mater.* 2017;321:547–56.
26. Poltue T, Suddeepong A, Horpibulsuk S, Samingthong W, Arulrajah A, Rashid ASA. Strength development of recycled concrete aggregate stabilized with fly ash-rice husk ash based geopolymer as pavement base material. *Road Mater Pavement Des.* 2020;21(8):2344–55.
27. Hoy M, Horpibulsuk S, Arulrajah A. Strength development of recycled asphalt pavement–fly ash geopolymer as a road construction material. *Constr Build Mater.* 2016;117:209–19.
28. Davidovits J. *Geopolymer chemistry and applications*. 2nd ed. Saint-Quentin: Inst Geopolymer; 2008.
29. Fletcher RA, MacKenzie KJ, Nicholson CL, Shimada S. The composition range of aluminosilicate geopolymers. *J Eur Ceram Soc.* 2005;25(9):1471–7.
30. Wijaya AL, Ekaputri JJ. Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste. In: *MATEC Web Conf.* 2017;138:1–6.
31. Chindaprasirt P, Thaiwitcharoen S, Kaewpirom S, Rattanasak U. Controlling ettringite formation in FBC fly ash geopolymer concrete. *Cem Concr Compos.* 2013;41:24–8.

-
32. Chindaprasirt P, Paisitsrisawat P, Rattanasak U. Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash-silica fume alkali-activated composite. *Adv Powder Technol.* 2014;25(3):1087–93.
 33. Rattanasak U, Pankhet K, Chindaprasirt P. Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. *Int J Miner Metall Mater.* 2011;18(3):364–9.
 34. Singh NB, Singh VD, Rai S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. *Cem Concr Res.* 2000;30(9):1485–8.
 35. Billong N, Kinuthia J, Oti J, Melo UC. Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin and rice husk ash: Effect on tensile strength and microstructure. *Constr Build Mater.* 2018;189:307–13.
 36. Buyondo KA, Olupot PW, Kirabira JB, Yusuf AA. Optimization of production parameters for rice husk ash-based geopolymer cement using response surface methodology. *Case Stud Constr Mater.* 2020;13:e00461.