

หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์

Unit weight and compressive strength of bagasse ash geopolymer mortar mixed with crumb rubber and cement

วรณิพงษ์ สระทองหลง^{1,*}, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์², ธนพล จะเจริญรัมย์³

^{1,2,3} สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: srathonglong2559@icloud.com

บทคัดย่อ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากการวัดตั้งต้นผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) บทความนี้ศึกษาสมบัติของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์ งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อเถ้าขานอ้อย เท่ากับ 2.75 เศษยางรถยนต์แทนที่ทรายร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของทราย อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เท่ากับ 50/50 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทดสอบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างที่อายุ 7 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้สามารถใช้เถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ ในงานวัสดุก่อสร้าง ซึ่งช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, เศษยางรถยนต์, เถ้าขานอ้อย

Abstract

Geopolymer as an environmental cementitious material, the synthetic components are obtained from mixed starting materials for hydroxide (NaOH) with silicate tray (Na_2SiO_3). The article properties of the study of rice bagasse Geopolymer mixed with scrap iron. This researcher used nutrition sand to sugarcane hardcore equal to 2.75, construction material cement ratio 5, 10, 15 and 20. In particular, the take-off texture (NaOH) and gateway (Na_2SiO_3) equal to 50/50 parts of hard hydroxide with a weight of 8 molar were tested for the compressive strength and unit weight of the samples at a life of 7 days. The test results of the compressive strength and unit weight properties of the rice bagasse polyimide mortar belt scrap tire alloy decreased with the amount of scrap tires. This research can use the bagasse geopolymer system to explore the business boards, which are mostly environmental problems.

Keywords: Geopolymer, Tire scraps, Bagasse ash

1. คำนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาสำคัญที่มีความสำคัญ เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้วัตถุพิษทางธรรมชาติมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น ในขบวนการ

ของอุตสาหกรรม เหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อภาวะโลกร้อน และปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมาก [1]

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) คือ วัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่ไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ เช่น เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า เถ้าขานอ้อย เศษหิน เศษแก้ว และวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ยังเป็นทางเลือกสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้อย เป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดยศาสตราจารย์โจเซฟ เดวิดคอฟ (Prof. Joseph Davidovits) จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอ-โพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ของสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยปฏิกิริยาในการเกิดจีโอโพลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ปล่อยความร้อนออกมา (Exothermic process) แบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ในขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Deconstruction) เป็นการก่อตัวของเครือข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งทำให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างรูปแบบอสัณฐานสามมิติ (Amorphous) ขั้นตอนที่สองคือการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบเจลของจีโอโพลิเมอร์จากอะลูมิเนียมและซิลิเกตในสารตั้งต้นกับสารละลายต่าง และขั้นตอนสุดท้ายคือการคงรูป (Stabilization) โดยเกิดขึ้นหลังจากการเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในช่วงอุณหภูมิคงที่ [2], [3], [4]

เถ้าขานอ้อยในประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตน้ำตาลในช่วงฤดูการผลิต 2560/2561 มีผลผลิตน้ำตาล 14.7 ล้านตันซึ่งถือเป็นผู้ผลิตรายใหญ่สุดของภูมิภาคตะวันออกในช่วงฤดูการปี 2561/2562 ไทยมี จำนวนปริมาณของอ้อยอยู่ที่ 131 ล้านตัน [5] ไทยผลิตน้ำตาลและส่งออกเป็นอันดับ 2 ของโลกในปี 2561/2562 ในขบวนการผลิตน้ำตาลเมื่อทำการหีบอ้อยแล้วจะเหลือขานอ้อยร้อยละ 27 ถึง 30 ของปริมาณอ้อยสดที่ถูกหีบ เอน้ำอ้อยออกขานอ้อยเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในช่วงฤดูหีบจะใช้ขานอ้อยร้อยละ 61.74 และช่วงละลายน้ำตาลจะใช้ขานอ้อย ร้อยละ 29.94 ส่วนช่วงซ่อมบำรุงรักษาจะใช้ขานอ้อยร้อยละ 7.25 และปริมาณขานอ้อยที่คงค้างในโรงงานมีร้อยละ 1.07 และเมื่อนำขานอ้อยมาเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วจะเหลือวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักขานอ้อยหรือคิดเป็นประมาณ 812,200 ตัน ต่อปี ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปทิ้งหรือถมที่บางส่วนเกษตรกรจะนำไปใส่แปลงเกษตรเพื่อเป็นปุ๋ย และส่วนใหญ่จะนำไปปรับสภาพดินบริเวณที่จะทำการเพาะปลูกที่มีสภาพเป็นกรด ซึ่งเถ้าขานอ้อยเหล่านี้มีสมบัติเป็นวัสดุพอใช้สถานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตหรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต [6]

เศษยางรถยนต์ในปัจจุบันมีปริมาณขยะจากยางรถยนต์เก่าจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นยางล้อรถยนต์รถบรรทุก รถจักรยาน ยางสำหรับรถที่ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรและเครื่องบิน เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีอายุการ

ใช้งานประมาณ 3 ถึง 5 ปี ก่อให้เกิดปัญหาด้านการกำจัดและเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการย่อยสลายยางรถยนต์เก่าด้วยวิธีบดขยี้ โดยการนำยางรถยนต์เก่ามาใส่เครื่องบดขยี้ หั่นยางเป็นชิ้นเล็กๆ คัดแยกเนื้อยางออกจากโครงยาง และหาขนาดชิ้นยางด้วยตะแกรงร่อน [7], [8]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์ศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ มีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำของที่ใช้แล้วหรือของเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่ ยังเป็นผลคือ ไม่ทำลายธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

2. วิธีการศึกษาวิจัย

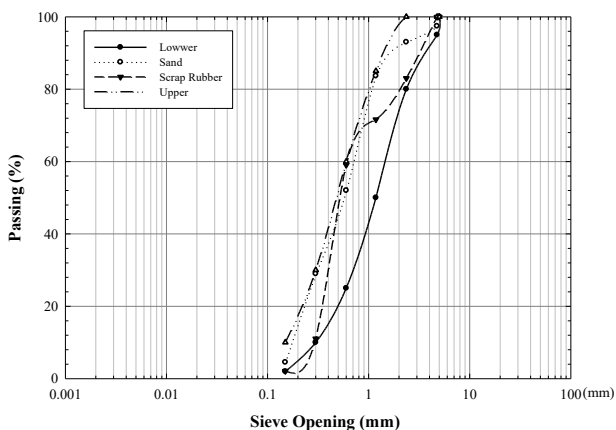
2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement: OPC) เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างทั่วไป มีความแข็งแรงสูง การยืดยาวต่ำ ใช้งานได้หลากหลายมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ และรูปทรงไม่แน่นอน [9] มีค่าความถ่วงจำเพาะของ เท่ากับ 3.15 ตามมาตรฐาน ASTM C188 [10]

เก้าชานอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดศรีสะเกษ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เพื่อสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดการซึมผ่าน [11] มีค่าความถ่วงจำเพาะของ เท่ากับ 2.60 ตามมาตรฐาน ASTM C188 [10]

มวลรวมละเอียด นำมาผสมทำเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ ทรายแม่น้ำ ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร ใช้ทรายเม็ดหยาบขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.07-4.75 มิลลิเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.74 ตามมาตรฐาน ASTM C127 และค่า Fineness Modulus F.M. เท่ากับ 2.26 ตามมาตรฐาน ASTM C33 [12], [13] แสดงดังรูปที่ 1

เศษยางรถยนต์ ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.12 ASTM D854 และค่า 1.12 Fineness Modulus, F.M. เท่ากับ 3.73 ASTM C33 [12], [13] แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดและเศษยางรถยนต์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งใช้เป็นสารกระตุ้นในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เท่ากับ 50/50 โดยทำการเตรียมโซเดียม

ไฮดรอกไซด์เกล็ดผสมกับน้ำสะอาดที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำการละลายได้ทั้งหมด

2.2 การทดสอบค่าการแผ่ไหลมอร์ตาร์

ทดสอบการแผ่ไหลของเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทุกส่วนผสม เพื่อประเมินความสามารถของมอร์ตาร์ในการกระจายตัวและไหล เมื่อปล่อยออกจากภาชนะ โดยไม่ต้องใช้แรงในการทำงานได้ โดยค่าการแผ่ไหลเท่ากับ 110 ± 5 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [14]

2.3 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

ทดสอบเพื่อประเมินความแข็งแรงในการรับแรงกดของเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องการความทนทานของวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M ขนาดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบ โดยใช้ทรงลูกบาศก์ $50 \times 50 \times 50$ มม. [15]

2.4 การทดสอบหน่วยน้ำหนักมอร์ตาร์

ทดสอบเพื่อหาหน่วยน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C138 [16]

2.5 การเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนในการผสมตัวอย่างเก้าชานอ้อยที่ผ่านการคัดกรองบดละเอียดทรายและเศษยางรถยนต์ที่ผ่านการร่อนตะแกรงเบอร์ 4 ใช้อัตราส่วนเก้าชานอ้อยต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 ปูนซีเมนต์แทนที่เก้าชานอ้อยร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับ เศษยางรถยนต์แทนที่ทรายร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของทราย อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เท่ากับ 50/50 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ อัตราส่วนผสมทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 1

ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงถึงชนิดของตัวอย่าง

BA หมายถึง เก้าชานอ้อย (Bagasse ash)

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ (Ordinary Portland Cement)

S หมายถึง ทรายแม่น้ำ (Sand)

CR หมายถึง เศษยางรถยนต์แทนที่ทรายร้อยละ (Rubber)

ตัวอย่าง

BASCR5%OPC10% (1)

อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเก้าชานอ้อย (AL/B)

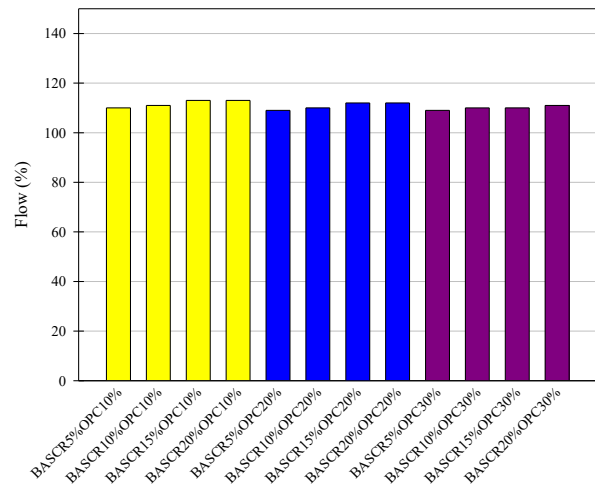
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมและสัญลักษณ์แทนตัวอย่างการทดสอบเทียบกับน้ำหนักของเถ้าขานอ้อย (กรัม)

สัญลักษณ์	เถ้าขานอ้อย	ปูนซีเมนต์	ทราย	เศษยางรถยนต์	AL/B
BASCR5%OPC10%	225	25	587.81	38.50	1
BASCR10%OPC10%	225	25	556.88	77.00	1
BASCR15%OPC10%	225	25	535.94	115.50	1.1
BASCR20%OPC10%	225	25	495.00	154.00	1.2
BASCR5%OPC20%	200	50	587.81	38.50	1
BASCR10%OPC20%	200	50	556.88	77.00	1.1
BASCR15%OPC20%	200	50	535.94	115.50	1.2
BASCR20%OPC20%	200	50	495.00	154.00	1.2
BASCR5%OPC30%	175	75	587.81	38.50	1
BASCR10%OPC30%	175	75	556.88	77.00	1.1
BASCR15%OPC30%	175	75	535.94	115.50	1.2
BASCR20%OPC30%	175	75	495.00	154.00	1.2

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ค่าการแผ่ไหลของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์

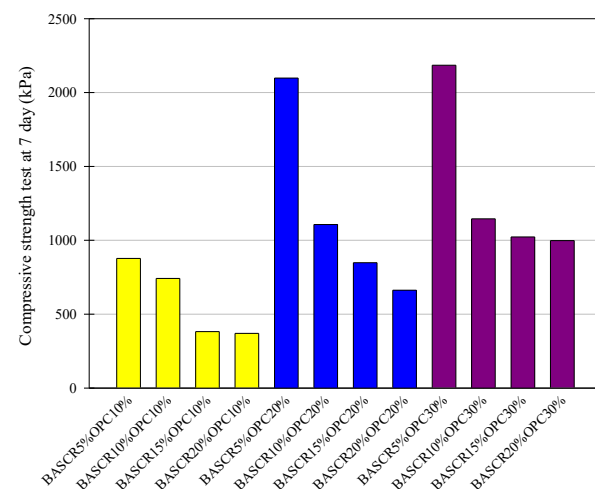
รูปที่ 2 แสดงค่าการไหลของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ พบว่าปริมาณเศษยางรถยนต์ส่งผลต่อการไหลของตัวอย่างเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ ค่า AL/B ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 การเพิ่มขึ้นของ AL/B เนื่องจาก การใช้เศษยางรถยนต์มาผสมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการของสารละลายลดลง แต่จะทำให้มอร์ตาร์มีความหนืดเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน จึงเป็นผลให้มอร์ตาร์ที่ผสมยางรถยนต์ ใช้เวลาการไหลเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของยางรถยนต์ [17] ในทางตรงกันข้าม การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยปูนซีเมนต์ไม่ส่งผลต่อค่า AL/B ยกตัวอย่าง ค่า AL/B ของตัวอย่างที่ผสมเศษยางรถยนต์ร้อยละ 20 มีค่าเท่ากับ 1.2 1.2 และ 1.2 สำหรับการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับ ค่า AL/B คงที่เนื่องจากปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์อาจจะมีน้ำส่วนเกิน (Excess water) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลต่อการค่าการแผ่ไหลของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าอัตราส่วน AL/B ที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้ความชื้นเหนียวลดลง [18]



รูปที่ 2 การทดสอบค่าการแผ่ไหลของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์

3.2 กำลังอัดของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์

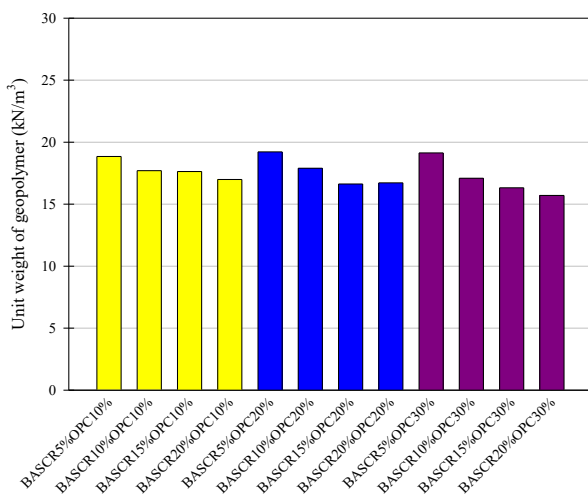
รูปที่ 3 แสดงกำลังอัดของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ เศษยางรถยนต์ส่งผลต่อกำลังอัดของตัวอย่างของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าลดลงตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพิสิษฐ ทองจับ [7] ที่ศึกษากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ที่ผสมเศษยางรถยนต์ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 ถึง 30 กำลังอัดของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มกำลังสูงสุดของตัวอย่างพบที่อัตราส่วนผสม BASCR5%OPC30% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,185 kPa



รูปที่ 3 การทดสอบกำลังอัดของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์

3.3 หน่วยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์

รูปที่ 4 แสดงหน่วยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์ในตัวอย่างเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ทำให้หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากหน่วยน้ำหนักของเศษยางรถยนต์มีค่าต่ำกว่าทราย โดยที่เศษยางรถยนต์มีหน่วยน้ำหนักประมาณ 11 - 12 kN/m³ ในขณะที่ทรายมีความหนาแน่นประมาณ 17 kN/m³ ซึ่งการแทนที่ทรายด้วยเศษยางรถยนต์ ทำให้มอร์ตาร์โดยรวมมีความหนาแน่นลดลง หน่วยน้ำหนักต่ำสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 15.07 kN/m³ ที่อัตราส่วนผสม BASCR20%OPC30% การแทนที่เถ้าขานอ้อยในปูนซีเมนต์ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักเพียงเล็กน้อย หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ที่สูงกว่า [15], [19]



รูปที่ 4 การทดสอบหน่วยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษยางรถยนต์

4. บทสรุป

1. การเพิ่มเศษยางรถยนต์ในตัวอย่างเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ทำให้ค่า AL/B เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดสูงขึ้น ส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อค่า AL/B ซึ่งมีค่าคงที่ตามการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์
2. กำลังอัดของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ลดลงเมื่อเพิ่มเศษยางรถยนต์ ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มปูนซีเมนต์แทนเถ้าขานอ้อยกำลังอัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ BASCR5%OPC30% เท่ากับ 2,185 kPa
3. การเพิ่มเศษยางรถยนต์ทำให้หน่วยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเศษยางรถยนต์และปูนซีเมนต์ลดลง เนื่องจากเศษยางมีน้ำหนักเบากว่าทราย ในขณะที่การเพิ่มปูนซีเมนต์แทนเถ้าขานอ้อยส่งผลให้หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะปูนซีเมนต์มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทรงฤทธิ์ พุทธลา. (2564). การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยและวัสดุเหลือทิ้ง. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [2] Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institute Geopolymers.
- [3] P. Duxson, G. C. Lukey, and J. S. J. van Deventer, "The thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 2 – Phase stability and structural development," *Journal of Non-Crystalline Solids*. vol. 353, no. 22-23, pp. 2186-2200, 2007.
- [4] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer. (2009). *Introduction to geopolymers in Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing. pp. 1-11, 2009.
- [5] F. A. Service. (2018). *Sugar Semi-annual: Thailand. United States Department of Agriculture*. Report No. TH2018-0025, Sep. 2018. [Online].
- [6] ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ. (2556). *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต*. กรุงเทพฯ : สมาคม คอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [7] พิสิษฐ ทองจับ. (2564). *สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมมวลรวมละเอียดจากเศษยางรถยนต์และเศษหินจากอุตสาหกรรมแกรนิต*. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [8] ภครัน เอมะปาน. (2553). *การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังผสมเศษยางรถยนต์*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [9] Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. (2016). *An investigation of bottom ash as a pozzolanic material*. Construction and Building Materials, 186, pp. 155-162.
- [10] American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. ASTM International. ASTM C188-17, 2017.
- [11] พิพัฒน์ อินพลาต และ สหภาพ หอมวิวัฒน์. (2563). *ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม*. วารสารวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยลัยนครสวรรค์. ปีที่ 18 ฉบับที่ 4 หน้า 12-20 ตุลาคม 2563.
- [12] American Society for Testing and Materials (2015). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (ASTM C127)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [13] American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33)*, West Conshohocken, PA, USA : ASTM International 2018.)
- [14] ASTM International. (2015). *ASTM C1437-15: Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM International.
- [15] Brown, T. (2023). *Lightweight concrete using waste tire rubber*. In *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering* (pp. 210–215). Bangkok, Thailand.

- [16] ASTM International. (2015). *ASTM C138-15: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. ASTM International.
- [17] ศุภกร ประพัทธ์ และ รัตชัยน์ สลักศรี. (2565). การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของมอร์ตาร์สดที่ผสมกับเศษลวดสลิ้งเม็ดยูเรียมและยางรถยนต์ใช้ในงานการซ่อมแซมผิวหน้าของคอนกรีต. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565*, หน้า MAT57-MAT57-9.
- [18] อติศักดิ์ ชนะพันธ์ และ สหภาพ หอมจุติวงศ์. (2563). การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขาน้อยและตะกอนน้ำประปาเผา. *วารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 3, หน้า 63-74.
- [19] Doe, J., & Smith, A. (2024). Effect of rubber waste on the properties of geopolymers. *Journal of Sustainable Materials*, 12(3), 45–57.