กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง
Compressive Strength of Cement Mortar Containing High Volume Palm Oil Fuel Ash

นภดล ศรภักดี[1] ทวิช กล้าแท้[2,*] ชูเกียรติ ชูสกุล[3] สุพร ฤทธิภักดี[4] ประชุม คำพุฒ[5] และ เชาฟีร์ ดือราแม[6]

[1, 2, 3, 4] *สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ*
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ. นครศรีธรรมราช
[5]*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี*
[6]*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร*
*Corresponding author; E-mail address: tawich.k@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ในปริมาณสูง ที่มีต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) มาบดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร แทนที่ OPC ที่ร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (CT, 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจากค่าปริมาณน้ำซึ่งทำให้เกิดค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110±5 ผลการทดสอบพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 33.4, 30.1, 23.9 และ 16.1 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 86, 77, 61 และ 41 ของ CT ตามลำดับ สำหรับการประเมินต้นทุนการผลิต พบว่า ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ OPC ด้วย GPOFA มีต้นทุนวัสดุลดลงร้อยละ 12 ถึง 42 ในขณะที่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 16 ถึง 56 เมื่อเทียบกับ CT จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า GPOFA เป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ OPC ได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อผลิตเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ด้วย

คำสำคัญ: ซีเมนต์มอร์ตาร์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, ปริมาณสูง, วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

This research aimed to investigate the effect of ground palm oil fuel ash (GPOFA) as high-volume cementitious material replacement on compressive strength of cement mortar. Palm oil fuel ash from factory (OPOFA) was ground until its median particle size (d_{50}) was 7.7 microns. GPOFA was then used to replace ordinary Portland cement (OPC) at 0, 20, 50, 60 and 70 wt% of binder (CT, 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA and 70GPOFA). The water-to-binder ratios were determine to achieve a flow valued of 110±5%. The results indicated that the 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA and 70GPOFA mortar had the compressive strengths at 28 days of 33.4, 30.1, 23.9 and 16.1 MPa or 86, 77, 61 and 41% of CT, respectively. In terms of the production cost, GPOFA cement mortar resulted in a reduction the material cost by 12–42%. However, environmental issues of 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA and 70GPOFA mortar showed a decrease in carbon dioxide emission of 16–56% as compared to CT mixture. Furthermore, GPOFA could be used as a good pozzolanic material to replace OPC by up to 50 wt% of binder for the production of eco–friendly materials as well as cost saving.

Keywords: Cement Mortar, Eco–friendly Materials, High Volume, Palm Oil Fuel Ash

1. คำนำ

อุตสาหกรรมพื้นฐาน เช่น ปูนซีเมนต์ เป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีปริมาณการใช้สูงในตลาดวัสดุก่อสร้าง และมีแนวโน้มขยายตัวตามสภาวะทางเศรษฐกิจ อันมีปัจจัยขับเคลื่อนมาจากการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ของภาครัฐ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงการเมกะโปรเจกต์ที่มีการก่อสร้างต่อเนื่อง และก่อสร้างโครงการใหม่ รวมถึงการลงทุนก่อสร้างภาคเอกชนทั้งโครงการที่อยู่อาศัยและอสังหาริมทรัพย์เพื่อการพาณิชย์ [1-2] ในปี 2022 ปริมาณการบริโภคปูนซีเมนต์ในประเทศไทยอยู่ในระดับ 35.1 ล้านตัน และการส่งออกปูนซีเมนต์และปูนเม็ด มีแนวโน้มอยู่ที่ 12.4 ล้านตัน ตามการฟื้นตัวของเศรษฐกิจของประเทศคู่ค้าหลัก ได้แก่ กัมพูชา บังกลาเทศ ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา [3] สำหรับในมิติด้านพลังงานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานในปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งใช้พลังงานความร้อนถึง 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ในการผลิตปูนเม็ด

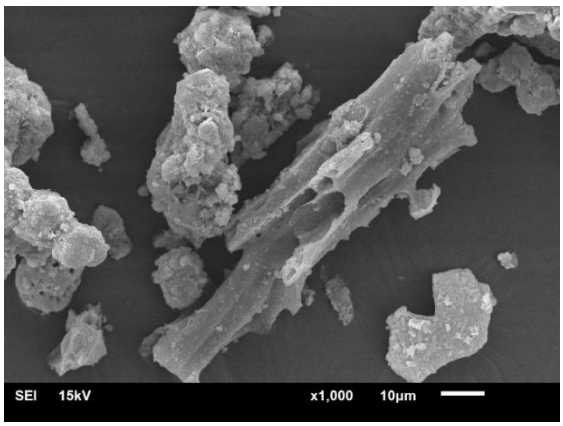
และการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่ง ซึ่งทุก ๆ 1 ตันของการผลิตปูนซีเมนต์คาดว่ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่บรรยากาศราว ๆ 1 ตัน โดยปริมาณก๊าซ CO_2 จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์คิดเป็นร้อยละ 5-7 ของทั้งหมดที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก เป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบเป็นวงกว้างแทบจะทุกพื้นที่ทั่วโลก [4-5] ในประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อใช้ในงานคอนกรีต หรือผลิตวัสดุก่อสร้างอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซิลิกาฟูม เถ้าปาล์มน้ำมัน หรือเถ้าชานอ้อย เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ [6-10] จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ดี หากมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ โดยการบดให้มีความละเอียดมากขึ้น หรือมีการแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561, 2562) [11] โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถเพิ่มสมบัติที่ดีด้านความคงทนของคอนกรีต เช่น Sata และคณะ [7] ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ในอัตราร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดความร้อนภายในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ Tangchirapat และ Jaturapitakkul [12] ได้ศึกษาการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันมีส่วนช่วยในการลดการซึมผ่านน้ำได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ต่อมา Kroehong และคณะ [13] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ผลการทดสอบพบว่า ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าการเติมเต็มช่องว่างของอนุภาควัสดุ (Filler Effect)

แม้ว่าปัจจุบันจะมีงานวิจัยการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แต่งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นเพียงงานวิจัยที่พิจารณาถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อีกทั้งการใช้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตยังไม่แพร่หลายมากนัก ต่างจากการใช้เถ้าถ่านหินซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานกันในปัจจุบัน เช่น ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก. 2594-2556, 2556) [14] ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง เพื่อผลิตซีเมนต์มอร์ตาร์ในอัตราร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยศึกษาผลของความต้องการน้ำและกำลังอัด เปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ยังมีการพิจารณาเรื่องความคุ้มค่าและผลต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้วัสดุประสานที่มีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้ง อีกทั้งยังเป็นการช่วยจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

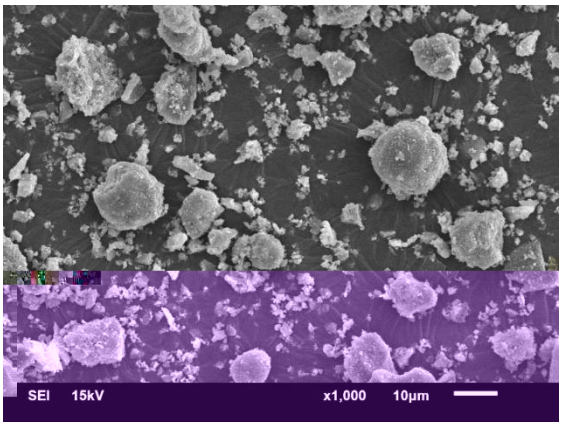
2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

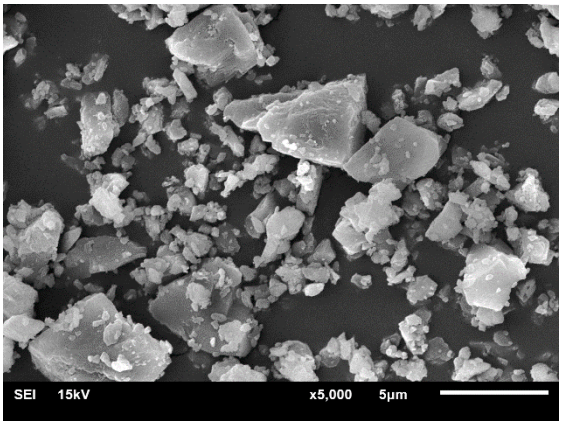
2.1.1 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) โดยเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ลักษณะทั่วไปของ OPOFA ก่อนบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 73.9 ไมโครเมตร มีสีดำปนเทา เนื้อเถ้าหยาบ ไม่มีรูปทรงชัดเจน รูปที่ 1 (a) หลังจากนำ OPOFA ไปทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบ (Los Angeles abrasion machine) เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง จะได้ GPOFA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร โดยการกระจายตัวของอนุภาคของ OPOFA และ GPOFA แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งลักษณะทั่วไปของ GPOFA มีสีดำสนิท เนื้อเถ้ามีขนาดเล็กละเอียด รูปที่ 1 (b) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.6, 1.2 และ 2.8 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบ เท่ากับร้อยละ 61.6 แสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมีของ GPOFA พบว่าอยู่ในเกณฑ์ชั้นคุณภาพที่ 1 ตามมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [11] เนื่องจากมีผลรวมขององค์ประกอบหลัก SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 10 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 12 ตามมาตรฐาน มอก. 2888-2561 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] พบว่า GPOFA อยู่ในประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งมีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่มีค่า LOI เกินร้อยละ ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] อยู่เล็กน้อย



(a) เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



(b) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



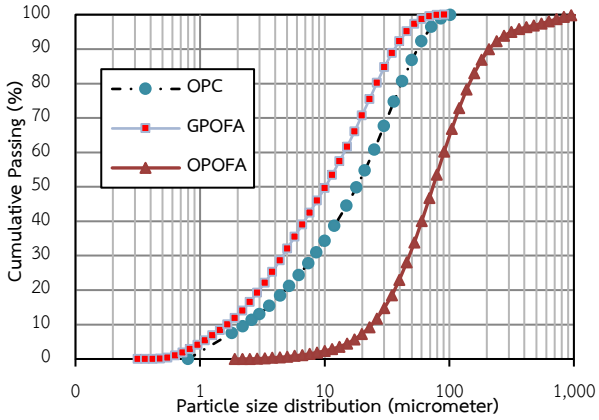
(c) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) กำลังขยาย 5,000 เท่า [6]

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาค

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) และ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

Materials		OPC	GPOFA
Physical Properties	Specific gravity	3.16	2.65
	Median particle size, d_{50} (μm)	18.1	7.7
Chemical Composition (%)	Silicon dioxide (SiO_2)	20.0	57.6
	Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.6	1.2
	Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.8
	Calcium oxide (CaO)	62.6	9.6
	Magnesium oxide (MgO)	1.2	4.7
	Potassium oxide (K_2O)	2.7	8.7
	Sodium oxide (Na_2O)	0.3	0.1
	Sulfur trioxide (SO_3)	2.4	2.2
	Phosphorus Oxide (P_2O_5)	-	5.5
	Chorine (Cl)	-	1.1
	Loss on ignition (LOI)	2.8	6.5
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	61.6

2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) มีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 [16] โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ CaO และ SiO_2 มีค่าร้อยละ 62.6 และ 20.0 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า LOI ร้อยละ 2.8 โดยทั่วไปมีสีเทาเข้ม เนื้อละเอียด มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีอนุภาคเล็กๆ เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 1 (c) [6] มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 18.1 ไมโครเมตร โดยสมบัติทางเคมี และการกระจายตัวของอนุภาค ของ OPC แสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA)

2.1.3 มวลรวมละเอียด ที่ใช้ในการศึกษาเป็นทรายแม่น้ำ ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 ค้างตะแกรงมาตรฐาน 100 โดยมีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C33 [17] ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง และค่าการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C128 [18] แสดงดังตารางที่ 2 โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.78 ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.62 และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.10 โดยมวลรวมละเอียด อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ก่อนผสม

ตารางที่ 2 สมบัติจำเพาะของมวลรวม

Properties	Fineness modulus	Specific gravity	Water absorption (%)
River Sand	2.78	2.62	1.10

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบมอร์ตาร์

การเตรียมตัวอย่างในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2.75 โดยน้ำหนัก แทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) จากการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [19] โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 [20-23] ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นหล่อตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ถอดแบบเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปบ่มน้ำสะอาด และทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตราฐาน ASTM C109 [24] ที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ได้มาจากค่าเฉลี่ยของ 5 ตัวอย่าง ซึ่งค่า

กำลังอัดของแต่ละตัวอย่างที่ได้ต้องไม่เกินร้อยละ 8.7 ของค่าเฉลี่ย ตามที่กำหนดโดย ASTM C109 [24]

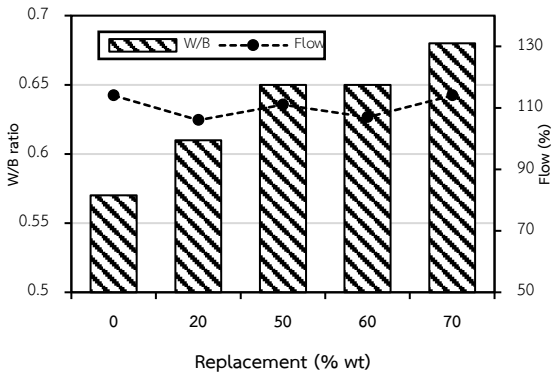
ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

Sample	Mix Proportion by Weight (g)				*Flow*
	Cement	GPOFA	Sand	W/B	*(%)*
CT	100	-	275	0.57	114
20GPOFA	80	20	275	0.61	106
50GPOFA	50	50	275	0.65	111
60GPOFA	40	60	275	0.65	107
70GPOFA	30	70	275	0.68	114

3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

3.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 แสดงความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย GPOFA ในปริมาณที่มากขึ้น โดยมอร์ตาร์ควบคุม (CT) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.57 ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสม GPOFA อัตราส่วนร้อยละ 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่ในช่วง 110±5 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.61, 0.65, 0.65 และ 0.68 ตามลำดับ หรือใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่มีค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีรูปร่างที่กลมสลับกับขรุขระ และมีความพรุนบางส่วน [7-9, 12-13, 25] เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (50GPOFA และ 60GPOFA) เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า OPC ส่งผลให้ GPOFA มีพื้นที่ผิวมากกว่า OPC ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน เช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานที่เป็นเถ้าชีวมวลอื่น ๆ เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย [8-9, 26-27]



รูปที่ 3 ผลของร้อยละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและการไหลแผ่

3.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CT, 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) ผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 15.1, 27.6, 31.5, 39.1 และ 47.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับมอร์ตาร์ควบคุมจากงานวิจัยที่ผ่านมา [20, 28-29] เมื่อพิจารณาดัชนีกำลังของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ามอร์ตาร์ 20GPOFA มีค่าดัชนีกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 2888-2561 [11] ระบุว่าดัชนีกำลังเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน จะต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 1 และไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 2 ของมอร์ตาร์ CT เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบปรากฏว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ 20GPOFA มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 81 และ 86 ของมอร์ตาร์ CT ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 [15]

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

Sample	Compressive Strength (MPa) *(Normalized compressive strength) (%)*				
	1 Day	3 Days	7 Days	28 Days	90 Days
CT	15.1±0.71 *(100)*	27.6±0.48 *(100)*	31.5±0.27 *(100)*	39.1±0.16 *(100)*	47.4±0.51 *(100)*
20GPOFA	10.4±0.4 *3 (69)*	19.9±0.36 *(72)*	25.6±0.52 *(81)*	33.4±0.28 *(86)*	43.7±0.26 *(92)*
50GPOFA	5.7±0.22 *(38)*	14.5±0.15 *(53)*	21.4±1.49 *(68)*	30.1±0.52 *(77)*	37.5±0.46 *(79)*
60GPOFA	2.7±0.08 *(18)*	10.2±0.65 *(37)*	15.1±0.10 *(48)*	23.9±0.14 *(61)*	30.8±0.18 *(65)*
70GPOFA	1.7±0.06 *(11)*	7.1±0.27 *(26)*	9.1±0.18 *(29)*	16.1±0.23 *(41)*	23.9±0.33 *(50)*

สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) มีกำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น โดยที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน มอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.7 ถึง 21.4 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 11 ถึง 68 ของมอร์ตาร์ CT เนื่องจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีปริมาณของ OPC ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ GPOFA เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะต้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุ 1, 3 และ 7 วัน มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ CT ค่อนข้างมาก [25, 30] นอกจากนั้นเห็นได้ว่าเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ในช่วงมาตรฐาน ซึ่งส่งผล

ให้มอร์ตาร์มีค่าอัตราส่วน W/B สูงขึ้นเป็นส่งผลต่อการพัฒนาของกำลังอัดต่อมาเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 และ 90 วัน มอร์ตาร์ 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีกำลังอัดเท่ากับ 30.1, 23.9, และ 16.1 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 77, 61 และ 41 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ และสามารถพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 37.5, 30.8 และ 23.9 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 79, 65 และ 50 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งได้ผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือ C-S-H จากการทำปฏิกิริยา โดย C-S-H มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน สามารถช่วยในการพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน ได้มากขึ้น นอกจากนี้การแทนที่ OPC ด้วย GPOFA (d_{50} =7.7 μm) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า OPC (d_{50} =18.1 μm) ถึง 2.35 เท่า มีส่วนในการช่วยให้เนื้อมอร์ตาร์มีความแน่นขึ้น เพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กของ GPOFA สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างช่องว่าง (Filler material) ของอนุภาคของเพสต์ และมวลรวมละเอียดได้ดียิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [11] และข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 [15] ซึ่งระบุดัชนีกำลัง (แทนที่ร้อยละ 20) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน จะต้องมีค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ CT เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบปรากฏว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ 50GPOFA มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 68 และ 77 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ และสามารถพัฒนากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 79 ของมอร์ตาร์ CT ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่มีปริมาณ OPC เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น

3.3 การประเมินราคาวัสดุของมอร์ตาร์

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบราคามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง 1 ลูกบาศก์เมตร โดยราคาวัสดุของการผลิตมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย OPC เท่ากับ 3,300 บาท/ตัน (165 บาท ต่อ ปูนซีเมนต์ 1 กระสอบ) ในขณะที่ GPOFA ซึ่งมีค่าการขนส่ง, ค่าแรงงานขนย้าย (ระยะทางไม่เกิน 200 กิโลเมตร) และค่าพลังงานในการบด ประมาณ 522 บาท/ตัน มวลรวมละเอียด 460 บาท/ตัน และน้ำสะอาด 32 บาท/ตัน (1 USD=34.80 บาท) [10, 31] จากการประเมินราคา พบว่ามอร์ตาร์ CT มีราคาเท่ากับ 2,062 บาท/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่มอร์ตาร์ 20GPOFA, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีราคาเท่ากับ 1,813, 1,439, 1,314 และ 1,189 บาท/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าราคารวมวัสดุของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 88, 70, 64 และ 58 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA สามารถลดต้นทุนราคาในการผลิตได้ประมาณร้อยละ 30-42 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT

ตารางที่ 5 ราคาวัสดุของมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร

Sample	Mix proportion, kg/m³ *(Baht/kg)*				Baht/m³	Cost Reduction (%)
	OPC	GPOFA	Fine agg.	Water		
CT	450 *(3.30)*	-	1,237.5 *(0.46)*	256.5 *(0.03)*	2,062	-
20GPOFA	360 *(3.30)*	90 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	274.5 *(0.03)*	1,813	12
50GPOFA	225 *(3.30)*	225 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	292.5 *(0.03)*	1,439	30
60GPOFA	180 *(3.30)*	270 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	292.5 *(0.03)*	1,314	36
70GPOFA	135 *(3.30)*	315 *(0.52)*	1,237.5 *(0.46)*	306.0 *(0.03)*	1,189	42

3.4 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของมอร์ตาร์

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดอิม ˇ

CT ที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ ในขณะที่มีปริมาณ OPC เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น

3. มอร์ตาร์ที่ใช้ GPOFA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนวัสดุโดยรวมของมอร์ตาร์ ได้ประมาณร้อยละ 30–42 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CT

4. มอร์ตาร์ที่ใช้ GPOFA แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถลดปริมาณการปล่อย CO_2 ในการผลิตมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตร ได้มากถึงร้อยละ 40 ถึง 56 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CT

5. การใช้ GPOFA แทนที่ในปริมาณร้อยละ 50 (50GPOFA) สามารถพัฒนากำลังได้ถึง 37.5 MPa อายุ 90 วัน โดยสามารถลดต้นทุนได้ถึงร้อยละ 30 และลดการปล่อย CO_2 ได้ถึงร้อยละ 40 ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นวัสดุประสานที่มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] วิจัยกรุงศรี (2564). *แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-66 ธุรกิจวัสดุก่อสร้าง*. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566, เข้าถึงได้จาก https://www.krungsri.com/th/research/industry/summary-outlook/industry-summary-outlook-2021-2023

[2] วิจัยกรุงศรี (2565). *แนวโน้มธุรกิจและอุตสาหกรรม ปี 2565-67*. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566, เข้าถึงได้จาก https://www.krungsri.com/getmedia/07201ab9-d647-4e0e-8f67-7b9b34565c95/SO_Industry_Outlook_2022_2024__220111_TH_EX.pdf.aspx

[3] EIC Industry Insight (2565). *อุตสาหกรรมก่อสร้าง และวัสดุก่อสร้างปี 2022 ยังขยายตัวท่ามกลางต้นทุนปรับตัวสูงขึ้น*. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566, เข้าถึงได้จาก https://www.scbeic.com/th/detail/ product/8311

[4] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (2562). *มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566*, เข้าถึงได้จาก https://ghgreduction.tgo.or.th/th/download-tver/6 8 - tver-publications/1228-2019-09-30-04-25-05.html

[5]

International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[16] American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[17] American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C33 Standard specification for concrete aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[18] American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C128 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[19] American Society for Testing and Materials. (2007). *ASTM C1437 Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[20] Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 23(12), pp. 3523-3531.

[21] Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., and Chutubtim, S. (2001). A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. *Cement and concrete composites*, 23(4-5), pp. 335-343.

[22] Cheerarot, R., and Jaturapitakkul, C. (2004). A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. *Waste Management*, 24(7), pp. 701-709.

[23] Pormmoon, P., Abdulmatin, A., Charoenwaiyachet, C., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul, C. (2021). Effect of cut-size particles on the pozzolanic property of bottom ash. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, pp. 240-249.

[24] American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C109/C109M Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.

[25] Ul Islam, M.M., Mo, K.H., Alengaram, U.J. and Jumaat, M.Z. (2016). Durability Properties of Sustainable Concrete Containing High Volume Palm Oil Waste Materials. *Journal of Cleaner Production*, 137, pp. 167-177.

[26] Klathae, T., Tanawuttiphong, N., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., Sukontasukkul, P. and Jaturapitakkul, C. (2020). Heat evolution, strengths, and drying shrinkage of concrete containing high volume ground bagasse ash with different LOIs. *Construction and Building Materials*, 258, pp.119443.

[27] Klathae, T., Tran, T.N.H., Men, S., Jaturapitakkul, C. and Tangchirapat, W. (2021). Strength, chloride resistance, and water permeability of high volume sugarcane bagasse ash high strength concrete incorporating limestone powder. *Construction and Building Materials*, 311, pp.125326.

[28] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2008). Strength and Chloride Penetration of Mortar with Mixture Proportioning in Ternary Cementitious System. *KMUTT Research and Development Journal*, 31(4), pp. 659-869.

[29] สำเริง รักซ้อน ปุณยวัจน วงษ์วสุวัต และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2021). กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 16(2), หน้า 28-37.

[30] Men, S., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., and Ban, C. C. (2022). Strength, fluid transport and microstructure of high-strength concrete incorporating high-volume ground palm oil fuel ash blended with fly ash and limestone powder. *Journal of Building Engineering*, 56, pp. 104714.

[31] Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., Gajda, J. and Marceau, M. (2002). *Environmental life cycle inventory of Portland cement concrete*. Available Source: http://www.vangeemconsulting.com/73_Environmental_Life_Cycle_Inverntory_SN_2137.pdf, December 20, 2022.

[32] Huber Crete. (2015). *Let huber crete calcium carbonate help you produce the brightest white concrete building products possible*. Marble Falls, Texas: Huber Carbonates, LLC. Available Source: https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/ PFDocs/Let%20HuberCrete%20Help%20You%20Manufacture%20Superior%20Concrete.pdf. June 25, 2022.

[33] Leeuwen, R.V., Kim Y.J. and Sriraman, V. (2016). The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete. *Journal of Civil Engineering Research*, 6(4), pp. 104-113.