

การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักจากเถ้าโรงไฟฟ้าชีวมวล DEVELOPMENT OF NON-BEARING HOLLOW CONCRETE BLOCK FROM THE BIOMASS POWER PLANT ASH

วันที่รับ: 24 มิถุนายน 2565

วันที่แก้ไข: 11 พฤศจิกายน 2565

วันที่ตอบรับ: 16 พฤศจิกายน 2565

จรรยพร หลู่จิง¹, ภคมน ปินตานา^{1*},

นิกราน หอมดวง¹ และ ธเนศ ไชยชนะ¹

Janyaporn Lujing¹, Pakamon Pintana^{1*},

Nigran Homdoun¹ and Tanate Chaichana¹

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

*Corresponding author e-mail: p.pintana@gmail.com



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เถ้าจากการเผาไหม้ในโรงไฟฟ้าชีวมวล มาทดแทนสัดส่วนปูนซีเมนต์และทดแทนสัดส่วนทรายในการนำมาเป็นคอนกรีตบล็อก เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเชิงกล และค่าการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตได้ และเพื่อวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวลเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์ โดยศึกษาอัตราส่วน 0, 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ในการแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย ตามลำดับ ตัวอย่างมอร์ตาร์ ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร อายุการบ่ม 28 วัน ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เถ้าชีวมวลแทนปูนซีเมนต์ คือ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการไหลผ่าน 114.17 เปอร์เซ็นต์ หน่วยน้ำหนัก 222 กรัม การดูดซึมน้ำ 16.21 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่น 2.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร การนำความร้อน $0.436 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ และกำลังรับแรงอัด 2.53 เมกะปาสกาล และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เถ้าชีวมวลแทนทราย คือ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการไหลผ่าน 112.72 เปอร์เซ็นต์ หน่วยน้ำหนัก 236 กรัม การดูดซึมน้ำ 16.87 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่น 2.29 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร การนำความร้อน $0.427 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ และกำลังรับแรงอัด 2.61 เมกะปาสกาล โดยคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่ผลิตได้มีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ต้นทุนวัสดุผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักโดยผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทรายต่อก้อน 1.02 บาท และ 1.14 บาท ตามลำดับ ประโยชน์ของการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลเหลือทิ้ง

ทั้งปูนซีเมนต์และทราย เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาทำให้เกิดมูลค่าเพิ่ม และเป็นวิธีการกำจัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการลดปูนซีเมนต์และลดทราย

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อก, เถ้าชีวมวล, คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก



Abstract

The objectives of this research were 1) to study the optimal ratio of ash from combustion in biomass power plants to replace the cement proportion and replace the proportion of sand in concrete blocks, 2) to analyze the physical properties, mechanical properties, and thermal conductivity of the concrete blocks produced, 3) to analyze the cost of producing concrete blocks containing biomass ash compared to commercially sold concrete blocks. The ratios of 0, 20, 40, and 60% were examined by replacing cement and sand, respectively. The samples of mortar were molded with molds of 5 x 5 x 5 cm in size with curing age of 28 days. The results showed that the optimal mix rate for using biomass ash instead of cement was 40%, with a flow test of 114.17%, a unit weight of 222 g, a water absorption of 16.21%, a density of 2.19 g/cm³, a thermal conductivity of 0.436 W/m·K, and a compressive strength of 2.53 MPa. The optimal mixing rate for biomass ash instead of sand was 40%, with a flow test of 112.72%, a unit weight of 236 g, a water absorption of 16.87%, a density of 2.29 g/cm³, a thermal conductivity of 0.427 W/m·K, and a compressive strength of 2.61 MPa. The non-weight hollow concrete blocks had properties that could be used in the construction industry. The material cost producing non-weight hollow concrete blocks by mixing biomass ash instead of cement and replacing sand were 1.02 Baht and 1.14 Baht respectively. The benefits of replacing waste biomass ash in both cement and sand were the use of waste materials in order to create added values and it was an environmentally friendly disposal method by reducing cement and sand.

Keywords: Concrete Block, Biomass Ash, Non-weight Bearing Concrete Block.



บทนำ

ปัจจุบันพลังงานมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และมีแนวโน้มความต้องการที่จะใช้พลังงานมากขึ้นตามการขยายตัวของประชากรและการขยายตัวของเศรษฐกิจ การใช้พลังงานไฟฟ้าในปี 2562 สูงถึง 192,960 MW_h เพิ่มขึ้นเป็น 2.7 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ เนื่องจากมีการเข้าสู่ฤดูร้อนเร็วขึ้น และมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าปีก่อนประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส การประหยัดพลังงานเป็นสิ่งที่สำคัญมากทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ พลังงานที่ถูกใช้มากที่สุดในปัจจุบันนี้ เป็นการถูกใช้ในอาคารสำหรับการทำความร้อนและทำความเย็น สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ การปรับคุณสมบัติของผนัง โดยการลดการนำความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร ซึ่งประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นที่มีอุณหภูมิสูงเฉลี่ยค่อนข้างสูง ทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับสภาพอากาศเพื่อให้เหมาะสมแก่การพักอาศัย และการก่อสร้างผนังยังคงนิยมใช้เป็นคอนกรีตบล็อก ส่วนมากเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน จึงต้องให้ความสนใจกับวัสดุที่ใช้ในการผสมของการผลิตคอนกรีตบล็อก (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2562) ด้วยความต้องการไฟฟ้าที่มากขึ้น และการสนับสนุนให้เกิดโรงไฟฟ้าชีวมวลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากทั่วประเทศ จากการทำเกษตรเพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่มากขึ้น เศษซากที่เหลือทิ้ง เช่น แกลบ ฟางข้าว เศษไม้ และซังข้าวโพด เป็นต้น (อาภาพร สินธุสาร, 2552) ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ช่วยลดการกำจัดทำลายเผาซึ่งผิดวิธีที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เกิดความเสื่อมโทรมของดิน ซึ่งผลกระทบเหล่านี้มีผลโดยตรงกับมนุษย์ทั้งด้านสุขภาพร่างกาย ด้านการเกษตร และด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โรงไฟฟ้าชีวมวลของบริษัท สหโคเจน กรีน จำกัด สร้างขึ้นภายในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ จังหวัดลำพูน ด้วยเทคโนโลยีการผลิตพลังงานความร้อนที่ทันสมัยและขบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยปัจจุบันสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 9.6 เมกะวัตต์ (รายงานประจำปี (56-1 One Report) 2564, 2565) และพลังงานไอน้ำ 25 ton/h โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประมาณ 97,976 ton/y ได้แก่ เศษไม้ แกลบ ซังข้าวโพด เป็นต้น การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์แทนการกำจัดโดยการเผาซึ่งช่วยลดปัญหาหมอกควันและ PM 2.5 ในพื้นที่ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อมีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้การเผาไหม้จากโรงไฟฟ้ามากขึ้น สิ่งที่ได้จากการเผาไหม้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลคือ ถ่าน ด้วยคุณสมบัติมีน้ำหนักเบาและนำความร้อนต่ำ (วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และหมิง จิง, 2552)

ปัจจุบันมีการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก (Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Units) ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ โดยเพิ่มถ่านชีวมวล (Biomass Ash) เป็นส่วนผสม (จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา, 2565) คุณสมบัติของถ่านล่อยมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์ได้ เมื่อองค์ประกอบทางเคมีไปทำปฏิกิริยากับ

ต่างที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดการยึดประสาน ที่เรียกว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน” หรือ “วัสดุปอซโซลาน” ซึ่งเพิ่มคุณสมบัติในด้านการยึดประสาน และคุณสมบัติด้านกำลังอัด ความคงทน (เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล และคนอื่น ๆ, 2559) อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ได้กล่าวมา เป็นการศึกษาการใช้ถ้ำลอย และใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ แต่จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติแล้ว พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้ถ้ำชีวมวลหนักซึ่งเป็น ถ้ำอีกชนิดหนึ่งจากการเผาไหม้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลมาใช้งาน โดยศึกษาทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์ และการแทนที่ทราย ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และค่าการนำความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการช่วยนำของเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์มากขึ้น สามารถลดต้นทุน ในการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ได้แนวทางในการพัฒนาคุณสมบัติด้านการลด การนำความร้อนช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับถ้ำชีวมวลเหลือทิ้ง สามารถส่งเสริมนโยบายโรงไฟฟ้าชีวมวล ระดับชุมชนเพื่อเศรษฐกิจฐานรากได้อย่างครบวงจร



วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้ถ้ำจากการเผาไหม้ในโรงไฟฟ้าชีวมวล มาทดแทนสัดส่วนปูนซีเมนต์ และทดแทนสัดส่วนทรายในการนำมาเป็นคอนกรีตบล็อก
2. เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเชิงกล และค่าการนำความร้อน ของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตได้
3. เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของถ้ำชีวมวลเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์



วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก

1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ในการทดลองนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15-2547 มีความถ่วงจำเพาะ 3.15 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีปริมาณองค์ประกอบเคมีหลัก คือ CaO 66.73 เปอร์เซ็นต์ และ SiO_2 20.12 เปอร์เซ็นต์ (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ดังตาราง 1

1.2 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการทดลอง ต้องเป็นน้ำสะอาด ปราศจากสารเจือปน หรือสารอินทรีย์ ต่าง ๆ ไม่มีความเป็นกรดหรือด่าง หรือคราบน้ำมัน ถ้าในน้ำมีสารอินทรีย์ หรือมีสภาพ เป็นกรด ด่าง หรือคราบน้ำมัน ก็จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่เต็มที่ ทำให้ได้กำลังไม่สูงเท่า ที่ต้องการ ส่งผลให้บล็อกที่ผลิตออกมาไม่ได้มาตรฐาน (ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง และคนอื่น ๆ, 2563)

1.3 ทราย

ทรายที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2–5 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตในงานก่อสร้าง (ประชุม คำพุดม, 2559) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทรายมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ SiO_2 90.14 เปอร์เซ็นต์ และ Fe_2O_3 5.89 เปอร์เซ็นต์ ดังตาราง 1 ทรายมีลักษณะรูปร่างอนุภาคไม่แน่นอน ผิวค่อนข้างเรียบ มีความถ่วงจำเพาะ 2.63 ไม่มีความเหนียว (Non-Plastic) และสามารถดูดซึมน้ำ 0.70 เปอร์เซ็นต์ (ฐิติพร พันธุ์ทำช้าง และคนอื่น ๆ, 2563)

1.4 ถ้ำชีวมวล

วัตถุดิบถ้ำชีวมวลได้จากโรงไฟฟ้าสหโคเจน กรีน อำเภอลำพูน จังหวัดลำพูน ที่ใช้ขี้เถ้าขี้เถ้าแกลบ เปลือกข้าวโพด ขี้เถ้า และไม้ลำไย เป็นต้น ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และถ้ำชีวมวลมีความถ่วงจำเพาะ 2.19 และมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ SiO_2 70.40 เปอร์เซ็นต์ และ CaO 7.87 เปอร์เซ็นต์ มีผลรวมของปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 81.8 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะรูปร่างอนุภาคไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุน (วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และหมิง จิ่ง, 2552)

ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถ้ำชีวมวล และทราย (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547)

องค์ประกอบทางเคมี	ถ้ำชีวมวล (%)	ปูนซีเมนต์ (%)	ทราย (%)
SiO_2	70.40	20.12	90.14
Al_2O_3	6.72	5.22	ND
CaO	7.87	66.73	1.09
Fe_2O_3	4.68	3.26	5.89
MgO	1.64	0.53	ND
TiO_2	0.26	0.23	1.34
MnO_2	0.21	0.01	ND
K_2O	6.80	0.44	ND
SO_2	0.09	2.30	ND
P_2O_5	1.33	0.12	ND

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบข้อมูล

2. การผลิตมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวล

อัตราส่วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำ 1:2:1 เป็นอัตราส่วนทั่วไปที่ทำให้มีกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทรายด้วยเถ้าชีวมวล ในอัตราส่วน 0, 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และปริมาณน้ำที่ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีเถ้าชีวมวล แทนด้วยสัญลักษณ์ CS00 ตัวอย่างที่มีการลดสัดส่วนปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลในอัตราส่วน 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ แทนสัญลักษณ์ CSB20, CSB40 และ CSB60 ตามลำดับ และตัวอย่างที่มีการลดสัดส่วนทรายแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลในอัตราส่วน 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ แทนสัญลักษณ์ CSS20, CSS40 และ CSS60 ตามลำดับ ดังตาราง 2

ผสมวัตถุดิบตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ นำลงเทบนแม่พิมพ์ขนาด 5 x 5 x 5 cm จำนวนอัตราส่วนละ 5 ก้อน (วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และหมิง จิ่ง, 2552) ทิ้งให้แห้งสนิทระยะเวลา 5 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มจนถึงอายุ 28 วัน การบ่มในอุณหภูมิสูงก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มด้วยความชื้นทันที (อัมพรพรณดี ยูโษะ, 2552) เวลาที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตให้ขึ้นอยู่ตลอดเวลาได้ยาวนานเท่าใดก็จะยังได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำขึ้นการทดสอบไปทดสอบคุณสมบัติ และวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวน โดยกำหนดนัยสำคัญที่ 0.05

ตาราง 2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวล

สัญลักษณ์	อัตราส่วน การแทนที่ (%)	อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)			
		ปูนซีเมนต์ (g)	ทราย (g)	น้ำ (g)	เถ้าชีวมวล (g)
CS00 (ควบคุม)	0	100	200	100	0
CSB20	20	80	200	100	20
CSB40	40	60	200	100	40
CSB60	60	40	200	100	60
CSS20	20	100	180	100	20
CSS40	40	100	160	100	40
CSS60	60	100	140	100	60

3. การทดสอบคุณสมบัติมอร์ตาร์

3.1 การทดสอบคุณสมบัติไหลแผ่ปูนซีเมนต์

การทดสอบคุณสมบัติไหลแผ่ปูนซีเมนต์ เป็นการทดสอบขั้นตอนแรกของการสร้างตัวอย่าง ซึ่งจะบ่งชี้สภาพของคอนกรีตสด โดยทำการวัดการกระจายของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำที่ชุดทดสอบการไหลตัวของคอนกรีต (Flow Table) แบบหมุนมือ (มีค่า 110 ± 5 เปอร์เซ็นต์) ตามมาตรฐาน ASTM C109 (American Society for Testing and Materials, 1999)

3.2 การทดสอบคุณสมบัติดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวล

การทดสอบคุณสมบัติดูดซึมน้ำ โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำที่คอนกรีตบล็อกดูดซึมน้ำได้หลังจากการแช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับคอนกรีตบล็อกแห้ง ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำได้ 5–25 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นอยู่กับน้ำหนักและขนาด) ตามมาตรฐาน ASTM C20 (American Society for Testing and Materials, 2010; กระทรวงอุตสาหกรรม, 2533)

3.3 การทดสอบคุณสมบัติความหนาแน่น

การทดสอบคุณสมบัติความหนาแน่น คำนวณหาราคาความหนาแน่นจากมวลต่อปริมาตรของตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C139 (American Society for Testing and Materials, 2003)

3.4 การนำความร้อน

มีทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน การทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyses ตามมาตรฐาน ASTM C518 (American Society for Testing and Materials, 2015)

3.5 กำลังรับแรงอัด

มอร์ตาร์อายุการบ่ม 28 วัน จำนวนอัตราส่วนละ 5 ก้อน หาค่าความต้านแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบความต้านแรงอัดเครื่อง Compression Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM C39 และมีค่าไม่ต่ำกว่า 2.5 MPa (American Society for Testing and Materials, 2014)

4. วิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตจากคุณสมบัติการไหลแผ่ปูนซีเมนต์ การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด และการนำความร้อน นำอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ และแทนที่ทรายไปผลิตคอนกรีตบล็อก

ชนิดไม่รับน้ำหนัก และพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก 58-2533 นำข้อมูลปริมาณการใช้วัตถุดิบประเมินต้นทุนการผลิตเทียบกับการผลิตโดยอัตราส่วนผสมปกติ

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้ถ้ำจากการเผาไหม้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลมาทดแทนสัดส่วนปูนซีเมนต์ และทดแทนสัดส่วนทรายในการนำมาเป็นบล็อก

จากการเตรียมมอร์ตาร์ผสมถ้ำชีวมวลในอัตราส่วน 0, 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์ที่ผลิตได้มีรูปทรงตามต้องการ ปราศจากรอยบิ่น รอยร้าว ผิวหน้ามีความหยาบพอเหมาะสม ดังภาพ 1 และได้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเชิงกล และค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร (ตาราง 3) ดังนี้



ภาพ 1 มอร์ตาร์ผสมถ้ำชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ (CSB) และแทนที่ทราย (CSS)

ตาราง 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสม	การไหลแผ่ (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	กำลังรับแรงอัด (Mpa)	หน่วยน้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
CS00	111.81 ± 1.81	16.9 ± 8.10	2.79 ± 0.29	246 ± 37	2.33 ± 0.17	0.467 ± 0.520
CSB20	105.904 ± 10	14.89 ± 10.11	2.49 ± 0.01	216 ± 7	2.14 ± 0.02	0.446 ± 0.541
CSB40	114.17 ± 4.17	16.21 ± 8.79	2.53 ± 0.03	222 ± 13	2.19 ± 0.03	0.436 ± 0.551
CSB60	116.54 ± 6.54	18.69 ± 6.31	2.44 ± 0.06	201 ± 8	2.09 ± 0.07	0.421 ± 0.566
CSS20	109.65 ± 0.35	17.64 ± 7.36	2.38 ± 0.12	218 ± 9	2.11 ± 0.05	0.438 ± 0.549
CSS40	112.72 ± 2.72	16.87 ± 8.13	2.61 ± 0.12	236 ± 27	2.29 ± 0.13	0.427 ± 0.560
CSS60	117.53 ± 7.53	19.53 ± 5.47	2.52 ± 0.06	203 ± 6	2.05 ± 0.11	0.419 ± 0.568
พงษ์ศักดิ์ จิตตบุตร (2562)	NA	15.6	2.77	209	2.16	0.987
พัชร อ่อนพรม (2560)	NA	28	2.20	257	2.43	NA
สายสุนีย์ จำรัส และบุรฉัตร ฉัตรวีระ (2553)	112	14	NA	226	2.21	NA

2. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเชิงกล และค่าการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตได้

2.1 ผลการทดสอบการไหลแผ่ของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C109 ซึ่งค่ามาตรฐานอยู่ที่ $110 \pm 5\%$ โดยค่าการไหลแผ่ที่อยู่ในค่ามาตรฐาน คือ CS00 มีค่า $111.81 \pm 1.81\%$, CSB40 มีค่า $114.17 \pm 4.17\%$ และ CSS40 มีค่า $112.72 \pm 2.72\%$

2.2 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมถ้ำชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย มีค่าตามมาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมถ้ำชีวมวลที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

2.3 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C20 ซึ่งค่ามาตรฐานเฉลี่ยการดูดซึมน้ำได้ 5–25% โดย CS00 มีค่าการดูดซึมน้ำ $16.9 \pm 8.10\%$ คอนกรีตบล็อกผสมถ้ำชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย มีค่าตามมาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมถ้ำชีวมวลไม่เกิน 25% ดังนี้ CSB60 มีค่า $18.69 \pm 6.31\%$ และ CSS60 มีค่า $19.53 \pm 5.47\%$ และการดูดซึมน้ำใกล้เคียง CS00 ที่สุด คือ CSB40 มีค่า $16.21 \pm 8.79\%$ และ CSS40 มีค่า $16.87 \pm 8.13\%$

2.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นพบว่า CS00 มีค่าความหนาแน่น $2.33 \pm 0.17 \text{ g/cm}^3$ มอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่น ที่มีค่าความหนาแน่นสูงสุดและใกล้เคียงกับ CS00 คือ CSB40 มีค่า $2.19 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ทราย ที่มีค่าความหนาแน่นสูงสุดและใกล้เคียงกับ CS00 คือ CSS40 มีค่า $2.29 \pm 0.13 \text{ g/cm}^3$

2.5 ผลการทดสอบการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C518 โดย CS00 มีค่า $0.467 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ในขณะมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ CSB20 มีค่า $0.446 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, CSB40 มีค่า $0.436 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ และ CSB60 มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดของการแทนปูนด้วยเถ้าชีวมวล คือ $0.421 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ทราย โดย CSS20 มีค่า $0.438 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, CSS40 มีค่า $0.427 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ และ CSS60 มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดของการแทนปูนด้วยเถ้าชีวมวล $0.419 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

2.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 โดย CS00 มีค่ากำลังรับแรงอัด 2.79 MPa และอัตราส่วนที่มีค่าใกล้เคียง CS00 กับ คือ CSB40 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด 2.53 MPa และ CSS40 มีค่ากำลังรับแรงอัด 2.61 MPa

3. ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนในการผลิตบล็อกที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวลเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์

จากการวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ พิจารณาเฉพาะราคาต้นทุนวัสดุ เมื่อประเมินต้นทุนค่าวัตถุดิบแต่ละชนิด ดังนี้ เถ้าชีวมวลได้มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลสหโคเจน กรีน จำกัด จึงไม่มีค่าต้นทุนวัสดุทรายหยาบ ราคา 493 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ราคา 199 บาทต่อถุง และน้ำ 10 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน, 2564) เมื่อคำนวณจากการผลิตจำนวน 500 ก้อนต่อวัน ดังตาราง 4 ผลการวิเคราะห์ต้นทุน พบว่าเมื่อนำสัดส่วนที่เลือกมาผลิตคอนกรีตบล็อก ดังแสดงในภาพ 2 ขนาดความหนา $\times$ ความสูง $\times$ ความยาว คือ $7 \times 19 \times 14$ เซนติเมตร ตามลำดับ และความหนาของเปลือก 1.2 เซนติเมตร คอนกรีตที่ผลิตได้รูปทรงตามต้องการ ปราศจากรอยบิ่น รอยร้าว ผิวหน้าคอนกรีตทั้งสองก่อนมีความหยาบพอเหมาะแก่การนำไปฉาบปูนหรือแต่งปูน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2533) ทั้งนี้ต้นทุนการผลิตของ CSB40 คือ 1.02 บาทต่อก้อน และ CSS40 คือ 1.14 บาทต่อก้อน ซึ่งต้นทุนถูกลงจาก CS00 และเมื่อนำเปรียบเทียบกับราคาขายของคอนกรีตบล็อกทั่วไปตามท้องตลาด คือ 3.5 บาทต่อก้อน (อัปเดต ราคาวัสดุก่อสร้างปลายปี 2565, 2566) จะเห็นส่วนต่างของราคาขายกับต้นทุนคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ คือ 2.48 บาทต่อก้อน และคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ทราย คือ 2.36 บาทต่อก้อน



(ก)



(ข)

ภาพ 2 (ก) คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์

(ข) คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ทราย

ตาราง 4 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

รายละเอียด	CS00	CSB40	CSS40
	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูน	199.00	119.40	199.00
ทราย	38.00	38.00	22.80
น้ำ	0.75	0.75	0.75
ค่าแรง	350.00	350.00	350.00
รวมต้นทุนต่อวันในการผลิต 500 ก้อน	587.75	508.15	572.55
ต้นทุนต่อ 1 ก้อน	1.18	1.02	1.14



อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย พบว่าการแทนที่เถ้าชีวมวลของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด ในอัตราส่วน 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการไหลแผ่ใกล้เคียงค่าของปูนซีเมนต์ที่ไม่ผสมเถ้าชีวมวล และการแทนทรายจะมีอัตราการไหลมากกว่าแทนปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ, 2558) คุณสมบัติหน่วยน้ำหนักของ CSS นั้น เมื่ออัตราส่วนที่ผสมเถ้าชีวมวลมากขึ้นทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงแปรผกผันกับ CSB ที่อัตราส่วนที่เถ้าชีวมวลเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้หน่วยน้ำหนักมากขึ้น

ในการแทนที่ด้วยเสาชีวมวลเหลือทิ้ง ทำให้มอร์ตาร์มีน้ำหนักลดลง ช่วยให้น้ำหนักของงานก่อสร้างลดลง ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานโดยใช้คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชีวมวลไปใช้เป็นส่วนประกอบในงานผนัง จะช่วยลดน้ำหนักถาวรที่กระจายสู่โครงสร้างได้ (ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง และคนอื่น ๆ, 2563) การทดสอบการดูดซึมน้ำ พบว่าการใช้เถ้าชีวมวลเป็นส่วนผสมทุกอัตราส่วน มีผลค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ทั้งนี้อัตรา การแทนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าชีวมวลมีความชื้นตามธรรมชาติน้อย และมีความพรุนมาก พบว่าปริมาณของการผสมเถ้าชีวมวล (วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และหมิง จิ่ง, 2552) และด้วยคุณสมบัติของเถ้าชีวมวลที่มีรูพรุน ทำให้อากาศเข้าไปแทนที่ในรูพรุนทำให้ ความหนาแน่นน้อยลง และความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ น้อยกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ทราย (ประชุม คำพุด และกิตติพงษ์ สุวิโร, 2553) ในส่วนค่าการนำความร้อน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าปริมาณเถ้าชีวมวลที่เพิ่มขึ้นทำให้ การนำความร้อนของอิฐบล็อกมีค่าลดลง ในกลุ่มคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ทราย ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา $0.087 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ จะพบว่า ยังมีค่าสูงกว่ามาก แต่เมื่อเทียบกับอิฐมวลเบา $1.15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ก็ยังมีค่าน้อยกว่า (กานต์ สุขสงญาติ และคนอื่น ๆ, 2550) และเมื่อมีส่วนชีวมวลเพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง โดยเฉพาะเมื่อนำไปแทนที่ทราย ซึ่งมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบา ซึ่งเป็น คุณสมบัติของการเป็นฉนวนให้กับตัวอาคาร ในขณะที่ผลของค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อพิจารณา คุณสมบัติการมีรูพรุนสูงมาก และรูปร่างที่ไม่แน่นอนของเถ้าชีวมวล โดยปกติแล้วคอนกรีต ที่มีส่วนผสมจากเถ้าชีวมวลต้องใส่น้ำผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง การนำเถ้าชีวมวลมาบดให้ละเอียดขึ้น จะช่วยลดอายุการเสื่อมของเถ้าชีวมวลได้ และใช้สารลดน้ำ เข้าช่วยเพื่อให้คอนกรีตยังมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่าเดิม มีความสามารถในการเท ตามต้องการ เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ใช้เถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวต้นจะเพิ่มขึ้นไม่มาก แต่ระยะเวลาการ ก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ทำให้การเย็นตัวของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเถ้าชีวมวลมีพื้นที่ ผิวสูง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เถ้าชีวมวลผสมร่วมกับวัสดุปอซีโซลานอื่น เช่น เถ้าถ่านหิน ซึ่งทำให้วัสดุประสานมีคุณสมบัติดีขึ้นตามมาตรฐาน (วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และหมิง จิ่ง, 2552) การผสมเถ้าชีวมวลที่ไม่มากเกินไปช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้น (ชูเกียรติ ชูสกุล และ ขวัญชีวา หยงสตาร์, 2561) กำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์ดี การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น แต่การทน การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีของคอนกรีตดีขึ้น คุณสมบัติด้านอื่นจะมีความสัมพันธ์โดยตรง กับกำลังรับแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชีวมวล (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547)

จากผลการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย อัตราส่วน 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าการใช้เถ้าชีวมวลผสมแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย ในอัตราส่วนผสมส่งผลให้กำลังแรงอัดและความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง และการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนการผสมเถ้าชีวมวล แต่การใช้เถ้าชีวมวลผสมในปริมาณที่เหมาะสมในงานนี้ ได้แก่ อัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังแรงอัดการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นดีกว่าอัตราส่วน 20 และ 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมเถ้าชีวมวล (CS00) (พัชร อ่อนพรม, 2560) ในส่วนของอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมเถ้าชีวมวล (CS00) แล้วมีค่าน้อยเพราะมีช่องว่างอากาศเล็กหรือรูพรุนน้อยตามปริมาณการผสมเถ้าชีวมวล จึงส่งผลเสียต่อกำลังแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นน้อยตามปริมาณการผสมเถ้าชีวมวล และอัตราส่วน 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเถ้าชีวมวล (CS00) แล้วมีค่ามากกว่า เพราะมีการผสมเถ้าชีวมวลมากที่สุดจากอัตราส่วนอื่น ๆ ทำให้เกิดช่องว่างอากาศหรือรูพรุนมากกว่า อัตราส่วน 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ จึงส่งผลให้ค่ากำลังแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นมาก ตามปริมาณการผสมเถ้าชีวมวล (ณัฐวัตร ตันติกุลวิจิตร และวินัย อวยพรประเสริฐ, 2564) ทั้งนี้ ผลวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนพบว่า เมื่อใช้เถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย ในอัตราส่วน 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ มีผลกับค่าการไหลผ่าน การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ต่อคุณสมบัติด้านความหนาแน่นและค่าการนำความร้อน และเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกและผลทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่ใช้ส่วนผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูน 40 เปอร์เซ็นต์ และแทนที่ทราย 40 เปอร์เซ็นต์ เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีแนวโน้มในการพัฒนาเพื่อผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ ค่าการนำความร้อนต่ำ และมีต้นทุนที่ถูกลง จึงเป็นทางเลือกให้กับธุรกิจการผลิตคอนกรีตบล็อกให้สามารถผลิตได้ราคาต้นทุนต่ำกว่าเดิม และได้คุณภาพมาตรฐาน (ศราวุธ ปฎิญาศักดิ์, 2560)



สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย พบว่าเถ้าชีวมวลสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์และทรายได้ในบางส่วนของงานคอนกรีต เมื่อใช้เถ้าชีวมวลทดแทนปูนซีเมนต์จะมีความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และค่ากำลังแรงอัดน้อย และใช้เถ้าชีวมวลทดแทนทรายบางส่วนทำให้มีความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังแรงอัดมีค่าที่ดีขึ้น แต่เมื่อมีการผสมเถ้าชีวมวลในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่ากำลังแรงอัดลดลง

โดยอัตราส่วนในการใช้เถ้าชีวมวลแทนปูนซีเมนต์และแทนทรายที่ อัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์ อายุ 28 วัน มีค่าดีที่สุดในงานวิจัยนี้ ในขณะที่ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีสัดส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลที่เพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. การนำไปใช้งานจริงควรทดสอบคุณสมบัติของอิฐบล็อกด้วยขนาดมาตรฐาน มอก. 58-2533 ต่อไป
2. การทดสอบนี้ใช้วัตถุดิบเถ้าชีวมวลจากแหล่งโรงไฟฟ้าเดียว ซึ่งใช้วัตถุดิบได้แก่ เศษไม้ แกลบ ชังข้าวโพด เป็นต้น ดังนั้นการจะนำผลการทดสอบไปใช้อ้างอิงเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักจากเถ้าชีวมวลจากแหล่งโรงไฟฟ้าอื่น ควรทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าชีวมวลก่อนนำมาผลิต

ข้อเสนอแนะการวิจัยครั้งต่อไป

แม้ว่าเถ้าชีวมวลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติของเถ้าชีวมวลในงานนี้มีความเป็นไปได้อย่างมากที่จะสามารถใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมตามข้อสรุป แต่ควรมีการศึกษาผลของน้ำที่มีต่อค่ากำลังอัดและคุณสมบัติอื่น ๆ เพื่อหาอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมต่อไป



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ ทูสนันสนุนงานวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และโรงไฟฟ้าชีวมวล สหโคเจน กรีน จำกัด สำหรับข้อมูลและตัวอย่างเถ้าชีวมวลในการดำเนินงานวิจัยนี้



เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2533). *ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1619 (พ.ศ. 2533)*. สืบค้น 7 มิถุนายน 2565, จาก <http://ptg.co.th/TIS/TIS58-2533.pdf>
- กานต์ สุขสงญาติ, อธิพิงศ์ ชัยสายัณห์, อำนาจ จันทร์กะพ้อ, ปรีดา จันทวงศ์, วิชาญ วิมานจันทร์, และพิชัย นามประกาย. (2550). การศึกษาเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างบ้านที่ใช้ผนังอิฐมอญกับผนังมวลเบาด้านการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติทางความร้อน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 17(2), 34–42.
- จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. (2565). การศึกษาคุณสมบัติบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักผสมเถ้าลอยชีวมวลในพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, 10(1), 1–15.

- ชูเกียรติ ชูสกุล และขวัญชีวา หยงสตาร์. (2561). กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้หินฝุ่นแทนทราย. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 10(2), 324–332.
- ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง, วีระชาติ อินตา, จีรวัฒน์ คำใจ, และเศวตสุนทร ชินะกุล. (2563). กำลังแรงอัดของอิฐบล็อกประสานจากดินลูกรังผสมซีเมนต์ด้วยเถ้าหินและเถ้าชีวมวล. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่*, 5(1), 15–24. <https://doi.org/10.14456/rmutlengj.2020.3>
- ณัฐวัตร ตันติกุลวิจิตร และวินัย อวยพรประเสริฐ. (2564). ผลกระทบของสารลดน้ำอย่างมากที่มีผลต่อการไหลแผ่ กำลังอัด และกำลังดึงของมอร์ตาร์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26* (น. 1–8). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- บุรฉัตร ฉัตรวิระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ. (2558). กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ เถ้าลอยระยะของบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าภายใต้การกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต. *วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์*, 3(1), 25–33.
- ประชุม คำพุม. (2559). ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนซีเมนต์และหินฝุ่นแทนทรายบางส่วน. *วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต*, 4(3), 461–470.
- ประชุม คำพุม และกิตติพงษ์ สุวีโร. (2553). *การศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบเสริมแผ่นยางธรรมชาติ* (รายงานการวิจัย). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- พงษ์ศักดิ์ จิตตบุตร. (2562). สมบัติเชิงกลและการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 29(2), 342–351.
- พัชร อ่อนพรม. (2560). การใช้เถ้ากลบแทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบา. *บทความวิจัยและนวัตกรรมอาชีวศึกษา*, 1(1), 37–54.
- เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาติน, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2559). การพัฒนากำลังอัดคอนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, 4(1), 11–19.
- รายงานประจำปี (56-1 One Report) 2564. (2565). สหโคเจน. สืบค้น 7 มิถุนายน 2565, จาก https://sahacogen.com/?page_id=343

- วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และหมิง จิ่ง. (2552). การใช้เถ้าชีวมวลในการพัฒนานวัตกรรมผนังคอนกรีตมวลเบาเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคาร (รายงานการวิจัย). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ศราวุธ ปริญญาศักดิ์. (2560). การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักโดยมีส่วนผสมเพิ่มของเถ้าลอย [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สายสุนีย์ จำรัส และบุรฉัตร ฉัตรวีระ. (2553). อิทธิพลของสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 33(2), 145–162.
- สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน. (2564, 8 พฤศจิกายน). บัญชีราคาค่าวัสดุและค่าแรง ปีงบประมาณ 2665. โยธาไทย. สืบค้น 7 มิถุนายน 2565, จาก <https://www.yotathai.com/yotanews/cost-build-65>
- สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ มอก. 15-2547. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2562, 5 พฤศจิกายน). บ้านประหยัดพลังงาน อยู่สู้ภาวะโลกร้อน. สืบค้น 7 มิถุนายน 2565, จาก <http://www.tgo.or.th/2020/index.php/th/post/บ้านประหยัดพลังงาน-อยู่สู้>
- อัปเดต ราคาวัสดุก่อสร้าง ปลายปี 2565. (2566, 10 มกราคม). บ้านและสวน. สืบค้น 16 มิถุนายน 2565, จาก <https://www.baanlaesuan.com/221417/maintenance/material-cost>
- อัมพรณดี ยูโซะ. (2552). ผลกระทบของอุณหภูมิน้ำผสมคอนกรีตต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีต. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 1(2), 62–71.
- อาภาพร สินธุสาร. (2552). เถ้าแกลบ: วัสดุเหลือทิ้ง (ไม่) ไร้ค่า. สำนักเทคโนโลยีชุมชน. สืบค้น 20 มิถุนายน 2563, จาก https://www.dss.go.th/images/st-article/ct_6_2552_Husk.pdf
- American Society for Testing and Materials. (1999). Annual Book ASTM Standards. ASTM C109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens. สืบค้น 2 มิถุนายน 2565, จาก https://kupdf.net/download/astm-c109_5c2baac7e2b6f5c14d04844c_pdf

- American Society for Testing and Materials. (2003). Annual Book of ASTM Standards. *ASTM C139: Standard Specification for Concrete Masonry Units for Construction of Catch Basins and Manholes*. สืบค้น 2 มิถุนายน 2565, จาก <https://civilfield.co/2021/08/22/astm-c-139-03-pdf-free-download/>
- _____. (2010). Annual Book ASTM Standards. *ASTM C20: Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*. สืบค้น 2 มิถุนายน 2565, จาก https://www.researchgate.net/publication/334307526_Standard_Test_Methods_for_Apparent_Porosity_Water_Absorption_Apparent_Specific_Gravity_and_Bulk_Density_of_Burned_Refractory_Brick_and_Shapes_by_Boiling_Water_1
- _____. (2014). Annual Book ASTM Standards. *ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. สืบค้น 2 มิถุนายน 2565, จาก https://kupdf.net/download/astm-c39-c39m-standard-test-method-for-compressive-strength-of-cylindrical-concrete-specimens-pdf_58e6abe4dc0d609541da9821_pdf
- _____. (2015). Annual Book of ASTM Standards. *ASTM C518: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*. สืบค้น 2 มิถุนายน 2565, จาก https://kupdf.net/download/c-518-15pdf_5c2a3d12e2b6f56a70ac8249_pdf