

การนำวัสดุเหลือทิ้งเถ้านักไม้อย่างพาราใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนั

Utilization of Waste Materials Rubberwood Bottom Ash in the Production of Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Unit

ทวีศักดิ์ ทองขวัญ¹ ถาวร เกื้อสกุล^{1*} จุฑามาต ลักษณกิจ¹ นันทชัย ชูศิลป์¹ วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง¹ อรุณ ลูกจันทร์¹ พงศ์ศักดิ์ สุขมณ¹ และเปรมณช ชุมพ้อม¹

Thaweesak Thongkhan¹ Tavn Kuasakul^{1*} Chuthamat Laksanakit¹ Nuntachai Chusilp¹ Wisitsak Tabyang¹ Arun Lukjan¹ Pongsak Sookmanee¹ and Premmanat Chumprom¹

Received: December 31, 2024; Revised: April 30, 2025; Accepted: April 30, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เถ้านักไม้อย่างพาราเป็นมวลรวมสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนั โดยใช้เถ้านักไม้อย่างพาราแทนที่มวลรวมจากหินฝุ่นร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนั มีอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวม 1:6 1:7 1:8 1:9 และ 1:10 โดยศึกษาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) สามระดับ คือ 0.50 0.60 และ 0.70 รวมทั้งสิ้น 45 อัตราส่วน คัดเลือกอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มากกว่า 4.14 MPa เพื่อนำไปผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัและทดสอบสมบัติตามเกณฑ์ของ มอก.58-2560 คือ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย และการนำความร้อนพบว่า มีเพียง 5 อัตราส่วนที่มีสมบัติผ่านเกณฑ์ คือ อัตราส่วน 1:6 หินฝุ่นร้อยละ 75 เถ้านักไม้อย่างพาราร้อยละ 25 ค่า W/C 0.6 - 0.7 อัตราส่วน 1:6 หินฝุ่นและเถ้านักไม้อย่างพาราเท่ากันร้อยละ 50 ค่า W/C 0.7 และอัตราส่วน 1:7 หินฝุ่นร้อยละ 75 เถ้านักไม้อย่างพาราร้อยละ 25 ค่า W/C 0.6 - 0.7 โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วน 1:6 หินฝุ่นและเถ้านักไม้อย่างพาราเท่ากันร้อยละ 50 ค่า W/C 0.7 เพราะไม่เพียงแต่ใช้ปริมาณเถ้านักไม้อย่างพาราได้สูงถึงร้อยละ 50 ยังมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.863 W/m-K แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงในการนำเถ้านักไม้อย่างพาราแทนที่มวลรวมเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัและเป็นแนวทางการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : คอนกรีตบล็อกกลวงแบบไม่รับน้ำหนั; เถ้านักไม้อย่างพารา; หินฝุ่น; วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 6299 6353, E - mail: tavorn.k@rmutsv.ac.th

Abstract

This study aims to evaluate the feasibility of using rubberwood bottom ash (RWBA) as an aggregate in the production of non-load-bearing hollow concrete blocks. The investigation involves replacing 25 % and 50 % by weight of stone dust with rubberwood bottom ash. Five mixtures of hydraulic cement to aggregate by weight were tested: 1:6, 1:7, 1:8, 1:9, and 1:10. Each mixture was further analyzed at three different water-to-cement (W/C) ratios: 0.50, 0.60, and 0.70, resulting in a total of 45 mixtures. Mixtures at 28-days curing age with average compressive strength exceeding 4.14 MPa were selected for the production of hollow concrete blocks. These blocks were subsequently tested for compliance with the Thai Industrial Standard TIS 58-2560, assessing density, water absorption, average compressive strength, and thermal conductivity. The results revealed that only five mixtures met the standard criteria: Mix ratio 1:6 with 75 % stone dust and 25 % RWBA at W/C ratios of 0.6 and 0.7, Mix ratio 1:6 with equal proportions (50 %) of stone dust and RWBA at a W/C ratio of 0.7, and Mix ratio 1:7 with 75 % stone dust and 25 % RWBA at W/C ratios of 0.6 and 0.7. Among these, the optimal mixture was identified as the mix ratio 1:6 with 50 % stone dust and 50 % RWBA at a W/C ratio of 0.7. This mixture not only allowed for the highest replacement rate of RWBA (50 %) but also exhibited the lowest thermal conductivity at 0.863 W/m.K. The findings indicate a high potential for utilizing rubberwood bottom ash as a partial replacement for fine aggregates in the production of non-load-bearing hollow concrete blocks. This approach contributes to the development of environmentally friendly construction materials.

Keywords: Non-Load-Bearing Hollow Concrete Blocks; Rubberwood Bottom Ash; Stone Dust; Eco-Friendly Construction Materials

บทนำ

คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ใช้สำหรับการก่อสร้างทำผนัง และใช้เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากสามารถผลิตได้ง่ายมีราคาถูก การก่อสร้างยังทำได้เร็วกว่าอิฐมอญเนื่องจากมีขนาดก้อนที่ใหญ่กว่าและมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าอิฐมอญ แต่ก็ยังสูงกว่าคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ใช้สำหรับการก่อสร้างทำผนัง และใช้เป็นที่แพร่หลายมาเป็นเวลาช้านานเนื่องจากเป็นวัสดุที่ผลิตได้ง่ายมีผู้ผลิตจำนวนมาก และครอบคลุมไปทุกพื้นที่ การก่อสร้างยังทำได้รวดเร็วจึงทำให้คอนกรีตบล็อกยังเป็นที่นิยมใช้งานอยู่ในปัจจุบันด้วยราคาของคอนกรีตบล็อกที่ถูกกว่าคอนกรีตมวลเบาหลายเท่า (Thammasri et al., 2022) โดยลักษณะนั้นจะเป็นบล็อกที่มีรูกลวงเป็นช่องอากาศภายใน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของการเป็นฉนวน (Hendry, 2001) โดยการผลิตใช้มวลรวมผสมกับปูนซีเมนต์ใช้น้ำสะอาดในปริมาณที่เหมาะสมในการเชื่อมประสาน ทำการอัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดแล้วนำมาบ่มให้คอนกรีตบล็อกแข็งตัว ซึ่งมวลรวมที่ใช้ส่วนใหญ่ทางภาคใต้จะเป็นจำพวกหินฝุ่น ที่ได้จากการย่อยหินซึ่งต้องทำลายทรัพยากรธรรมชาติ โดยการระเบิดภูเขาเพื่อนำมาไม่หินแล้วแยกเป็นขนาดต่าง ๆ เกิดฝุ่นละอองในอากาศส่งผลกระทบต่อเนื่องด้านทัศนียภาพ และยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศด้วย (Kumlom and Nanthabut, 2020)

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดในการใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของพาราเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงาน และโรงไฟฟ้าชีวมวลในพื้นที่จังหวัดสงขลา โดยจากข้อมูลพบว่าบริษัทผลิตไม้ปาร์ติเกิลบอร์ดอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา แห่งหนึ่งที่มีปริมาณเถ้าหนักไม้ยางพาราเหลือทิ้งมากกว่า 10 ตันต่อเดือน ที่ผ่านมามีการศึกษากำลังของมอเตอร์ที่ใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Thongkhwan et al., 2024) นำมา

ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์สำหรับผลิตรวมถึงนำมาผลิตแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์สำหรับลดความร้อนและช่วยดูดซับเสียง (Laksanakit et al., 2023) สำหรับเถ้าหนักไม้ยางพาราที่ผ่านมามีการนำมาใช้สำหรับทดแทนมวลรวมดินลูกรังในส่วนผสมของอิฐบล็อกประสาน (Kuasakul et al., 2017) พบว่าสามารถแทนที่มวลรวมได้สูงถึงร้อยละ 50 (Chumprom et al., 2024) ในการวิจัยเถ้าไม้ยางพาราสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่ผ่านมามีส่วนใหญ่มุ่งจะศึกษาโดยใช้เถ้าลอยไม้ยางพารา (Dasaesamoh et al., 2011; Klathae et al., 2020) งานวิจัยที่ใช้เถ้าหนักไม้ยางพาราน้อยมาก แต่จากข้อมูลบริษัท พาเนล พลัส จำกัด มีของเสียเถ้าไม้ยางพาราเหลือทิ้งมากถึง 150 ตันต่อวัน โดยมีเถ้าลอยร้อยละ 30 และเถ้าหนักมากถึงร้อยละ 70 การวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญของเถ้าหนักไม้ยางพารามาใช้เพื่อทดแทนวัสดุมวลรวมหินฝุ่นที่สำคัญสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง (Saengarithit, 2013) ที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) โดยออกแบบส่วนผสมและหล่อตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ เพื่อทดสอบแรงอัดสำหรับคัดเลือกอัตราส่วนที่มีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่า 4.14 MPa ในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง และทดสอบความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าหนักไม้ยางพาราใช้ประโยชน์ และลดปริมาณของเสียที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และลดการทำลายธรรมชาติจากการผลิตหินฝุ่น

วิธีการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

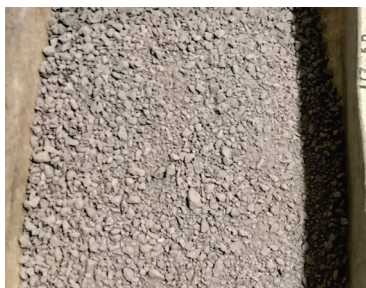
1.1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic Cement - General Use: GU) ตามมาตรฐาน มอก.2594-2556 (Thai Industrial Standards Institute, 2013) และ ASTM C1157-17 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014)

1.2 มวลรวม (Aggregate: A) งานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ

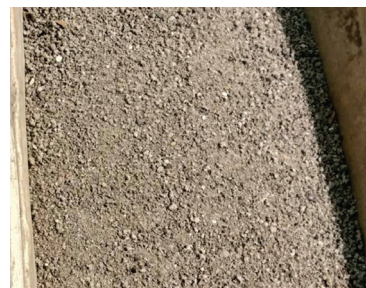
1) เถ้าหนักไม้ยางพารา (Rubberwood Bottom Ash: RWBA) จากการเผาไหม้ผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล พาเนล พลัส ไอโอ-เพาเวอร์ อำเภอดำรงใหญ่ จังหวัดสงขลา ดังรูปที่ 1 โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm. มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1099.64 kg/m^3 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 4.86 และมีขนาดคละดังรูปที่ 2

2) หินฝุ่น (Stone Dust: SD) จากโรงผลิตคอนกรีตบล็อกในอำเภอดำรงใหญ่ จังหวัดสงขลา ดังรูปที่ 1 โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm. มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $1,944.22 \text{ kg/m}^3$ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.34 และมีขนาดคละดังรูปที่ 2

1.3 น้ำสะอาด (Water) เลือกใช้น้ำประปา

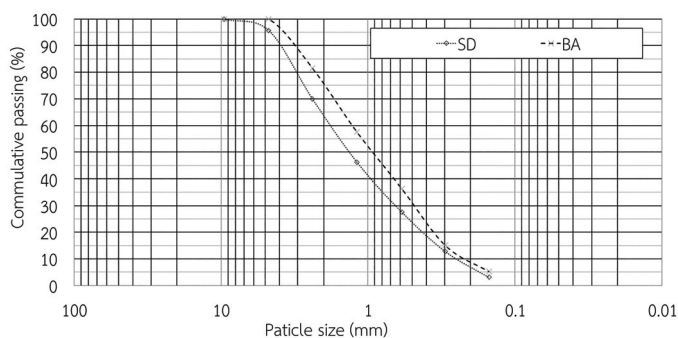


(ก) หินฝุ่น



(ข) เถ้าหนักไม้ยางพารา

รูปที่ 1 มวลรวมสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก



รูปที่ 2 ขนาดคละของเถ้าหนักไม้ยางพาราและหินฝุ่น

2. การออกแบบอัตราส่วนผสมและทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัย

2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสม (ตารางที่ 1)

1) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวม (GU:A) มี 5 อัตราส่วน คือ 1:6 1:7 1:8 1:9 และ 1:10 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของสิทธิชัย แสงอาทิตย์ ได้นำเสนอส่วนผสมสำหรับคอนกรีตบล็อกโดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งต่อหินฝุ่นในอัตราส่วนผสม 1:6 1:7 1:8 1:9 1:10 และ 1:11 โดยใช้ปริมาณน้ำคงที่ทุก (Saengarthit, 2013)

2) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมี 3 อัตราส่วน คือ 0.50 0.60 และ 0.70 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของนิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล นำหินฝุ่นมาเป็นส่วนผสมร่วมกับทราย และปูนซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตบล็อกประสาน โดยนำเสนออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.40 0.45 0.50 0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 และ 0.80 (Tanpaiboonkul, 2017)

3) อัตราส่วนของมวลรวมใช้เถ้าหนักไม้ยางพาราทดแทนหินฝุ่น มี 3 อัตราส่วน คือ ร้อยละ 0 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของเปรมนัช ชุมพร้อม และคณะ นำเถ้าหนักไม้ยางพาราเป็นมวลรวมของอิฐบล็อกประสาน ที่ร้อยละ 10 30 และ 50 (Chumprom et al., 2024)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ที่มีเถ้าหนักไม้ยางพาราส่วนประกอบ

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก:		มวลรวม (%)		น้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก		
มวลรวม	หินฝุ่น	เถ้าหนักไม้ยางพารา	0.50	0.60	0.70	
1:6	100	0	✓	✓	✓	
	75	25	✓	✓	✓	
	50	50	✓	✓	✓	
1:7	100	0	✓	✓	✓	
	75	25	✓	✓	✓	
	50	50	✓	✓	✓	
1:8	100	0	✓	✓	✓	
	75	25	✓	✓	✓	
	50	50	✓	✓	✓	
1:9	100	0	✓	✓	✓	
	75	25	✓	✓	✓	
	50	50	✓	✓	✓	
1:10	100	0	✓	✓	✓	
	75	25	✓	✓	✓	
	50	50	✓	✓	✓	

2.2 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของแต่ละอัตราส่วน

จากการออกแบบส่วนผสมมีจำนวนส่วนผสมทั้งหมด 45 อัตราส่วน จึงได้ทำการทดสอบการต้านทานแรงอัดด้วยก้อนตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ จำนวน 3 ตัวอย่าง ที่อายุ 28 วัน ทำการบ่มโดยไม่พรมน้ำ (Thai Industrial Standards Institute, 2017; Thai Industrial Standards Institute, 1990) เพื่อคัดเลือกเฉพาะอัตราส่วนที่มีผลทดสอบความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 4.14 MPa ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) สำหรับคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก หากอัตราส่วนใดมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานจะนำอัตราส่วนดังกล่าวไปทำการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงต่อไป

3. การผลิต การบ่ม และทดสอบคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

3.1 การผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง

- 1) เตรียมส่วนผสมตามอัตราส่วนข้อที่ 2.2 เทลงในเครื่องผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) การอัดขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด $70 \times 190 \times 390 \text{ mm}$ ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกของโรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง อำเภอลาดใหญ่ จังหวัดสงขลา จำนวน 12 ก้อนต่ออัตราส่วน

3.2 การบ่มคอนกรีตบล็อกกลวง

นำคอนกรีตบล็อกที่ได้ไปตากในที่ร่ม และทำการบ่มในอากาศไม่พรมน้ำเพื่อให้เหมือนกับการผลิตจริงของโรงงาน (Choosakul and Yongsata, 2022) ที่อายุ 28 วัน

3.3 การทดสอบคอนกรีตบล็อก

- 1) ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกอัตราส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คำนวณค่าความหนาแน่นด้วยสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{m_d \times 1000}{m_s - m_i} \quad (1)$$

เมื่อ

ρ	คือ	ความหนาแน่นมวลเชิงปริมาตร (kg/m^3)
m_s	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ (kg)
m_i	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่อชั่งในน้ำ (kg)
m_d	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออบแห้ง (kg)

- 2) ทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก หามวลอบแห้งโดยนำคอนกรีตบล็อกอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ถึง 115 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และหามวลอิมตัวด้วยน้ำด้วยการแช่น้ำจนอิมตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากการทดสอบค่าความหนาแน่นมาคำนวณตาม มอก.109-2517 (Thai Industrial Standards Institute, 1974) ด้วยสมการที่ (2)

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ} = \frac{(m_s - m_d)}{m_d} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ

m_s	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ (kg)
m_d	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออบแห้ง (kg)

- 3) ทดสอบความต้านทานแรงอัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกที่มีอายุการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง ใช้ปูนปลาสเตอร์ผสมน้ำฉาบปิดด้านบนและด้านล่างของก้อนตัวอย่างให้เรียบเสมอกันตาม มอก.109-2517 (Thai Industrial Standards Institute, 1974) ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแนวตั้งด้านแนวยาว (Length-Wise) โดยวิธี Bearing

Plate ใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คำนวณค่ากำลังรับแรงอัดด้วยสมการที่ (3)

$$P = \frac{F}{A_{n,avg}} \quad (3)$$

เมื่อ

P คือ ความต้านแรงอัดสุทธิ (MPa)
 F คือ แรงอัดสูงสุด (N)
 $A_{n,avg}$ คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิเฉลี่ย (mm^2)

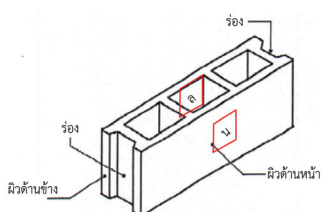
การหาคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดสุทธิเฉลี่ย จากการเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกกลวง โดยพิจารณาน้ำหนักและความสูงของแต่ละตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม คำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดสุทธิด้วยสมการที่ (4)

$$A_n = \frac{(m_s - m_i) \times 10^6}{H} \quad (4)$$

เมื่อ

A_n คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (mm^2)
 H คือ ความสูงเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)
 m_s คือ มวลขึ้นทดสอบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ (kg)
 m_i คือ มวลขึ้นทดสอบเมื่อชั่งในน้ำ (kg)

4) ทดสอบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตกลวง โดยทำการตัดตัวอย่างเปลือกผิวของคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด $50 \times 50 \text{ mm}^2$ จำนวน 2 ชิ้นตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม ตำแหน่งในการตัดดังรูปที่ 3 โดยใช้เทคนิคการทดสอบ Transient Plane Source Method ด้วยเครื่อง Thermal Constant Analyser รุ่น TPS 2500S ของสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา



รูปที่ 3 ตัวอย่างคอนกรีตกลวงสำหรับทดสอบสมบัติการนำความร้อน

ผลการวิจัยและการอภิปราย

1. ความต้านทานแรงอัดของแต่ละอัตราส่วน

การทดสอบตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ที่อายุ 28 วัน จำนวน 45 อัตราส่วนผสม ค่าการต้านทานแรงอัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.69 - 27.48 MPa ดังตารางที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่หินปูนด้วยเถ้าหนักไม้ยางพารา มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงทุกอัตราส่วนผสม โดยอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Gupta et al., 2019) เช่นเดียวกับอัตราส่วนต่อปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม พบว่ากำลังรับแรงอัด

มีค่าลดลงตามปริมาณมวลรวมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (C-S-H) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นการเกิด C-S-H เพิ่มส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงเช่นกัน (Choosakul and Yongsata, 2018; Sukontasukkul, 2013) ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอาศัยน้ำเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเพราะฉะนั้นอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์จึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่มีค่าสูงทำให้น้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชันหายไป การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด (Choosakul and Yongsata, 2018; Sukontasukkul, 2013) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดใน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักซึ่งมีการกำหนดความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 4.14 MPa พบว่ามีอัตราส่วนที่ผ่านทั้งสิ้น 22 อัตราส่วน และมีส่วนผสมของเถ้าหนักไม่ยางพาราเพียง 11 อัตราส่วน การผลิตคอนกรีตบล็อกกลางพิจารณาอัตราส่วนที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักไม่ยางพาราเป็นสำคัญ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกส่วน และใช้ทุกอัตราส่วนผสมที่นำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง
- 2) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:7 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจำนวน 6 อัตราส่วน ได้แก่ 1:7-100:0-0.50 1:7-100:0-0.60 1:7-100:0-0.70 1:7-75:25-0.50 1:7-75:25-0.60 และ 1:7-75:25-0.70 โดยอัตราส่วนหินฝุ่นต่อเถ้าหนัก 50:50 ไม่มีอัตราส่วนผสมใดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยเลือกทั้ง 6 อัตราส่วนผสมนำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง
- 3) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:8 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจำนวน 4 อัตราส่วน ได้แก่ 1:8-100:0-0.50 1:8-100:0-0.60 1:8-100:0-0.70 และ 1:8-75:25-0.70 โดยเลือก 2 อัตราส่วนผสม คือ 1:8-100:0-0.70 และ 1:8-75:25-0.70 นำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง
- 4) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:9 ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1:9-100:0-0.60 1:9-100:0-0.70 และ 1:9-75:25-0.70 โดยเลือก 2 อัตราส่วนผสม คือ 1:9-100:0-0.70 และ 1:9-75:25-0.70 นำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง
- 5) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:10 ไม่มีอัตราส่วนผสมใดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 2 ความต้านทานแรงอัดก้อนตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 mm³ ที่อายุ 28 วัน

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก: มวลรวม	มวลรวม (%)		ความต้านทานแรงอัด น้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก		
	หินฝุ่น	เถ้าหนักไม่ยางพารา	0.50	0.60	0.70
1:6	100	0	16.42	26.62	27.48
	75	25	9.18	13.37	15.47
	50	50	6.70	7.11	7.79
1:7	100	0	10.06	15.73	19.7
	75	25	5.63	5.88	8.98
	50	50	2.73	2.83	4.08
1:8	100	0	5.36	11.45	15.22
	75	25	2.42	2.51	7.13
	50	50	1.20	1.73	2.70

ตารางที่ 2 ความต้านทานแรงอัดก้อนตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 mm³ ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

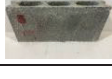
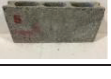
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก: มวลรวม	มวลรวม (%)		ความต้านทานแรงอัด น้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก		
	หินฝุ่น	เถ้าหนักไม้ยางพารา	0.50	0.60	0.70
1:9	100	0	3.95	6.12	12.48
	75	25	1.57	3.10	5.44
	50	50	0.88	1.15	2.67
1:10	100	0	2.05	3.31	3.64
	75	25	1.49	2.27	3.68
	50	50	0.78	0.69	1.17

2. ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวง

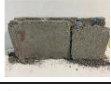
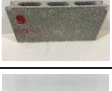
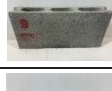
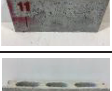
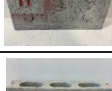
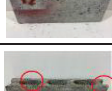
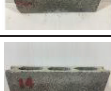
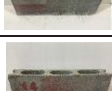
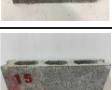
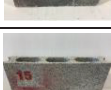
การผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงพบว่าสามารถอัดขึ้นรูปได้ 18 อัตราส่วน มีเพียงอัตราส่วนผสม 1:6-50:50-0.50 มีการแตกร้าว และยุบตัวไม่สามารถทดสอบคุณสมบัติได้ เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 mm³ จะถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จึงทำให้ก้อนตัวอย่างมีการแข็งตัวแล้ว ต่างจากการอัดขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกจะดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อของเครื่องทันทีทันใด (Chatveera et al., 2004) จึงแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกกลวงได้

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวง ตามมาตรฐานมอก. 58-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าผิวด้านหน้าคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักต้องไม่มีรอยผิวกะเทาะ รอยร้าว ถ้ามีรอยผิวกะเทาะต้องมีขนาดไม่มากกว่า 25 mm ณ ตำแหน่งใด ๆ รอยร้าวต้องมีขนาดกว้างไม่มากกว่า 0.5 mm และมีความยาวไม่มากกว่า 25 % ของความสูง พบว่าเมื่อครบอายุ 28 วัน มีเพียง 9 อัตราส่วน ที่มีลักษณะทางกายภาพที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานมอก. 58-2560 ดังตารางที่ 3 และมีอัตราส่วนที่ทดแทนเถ้าหนักไม้ยางพาราผ่านเกณฑ์จำนวน 5 อัตราส่วน คือ 1:6-75:25-0.60 1:6-50:50-0.70 1:7-75:25-0.60 และ 1:7-75:25-0.70 ในการทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงอัดสุทธิจึงเลือกเพียง 9 อัตราส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานมอก. เท่านั้น นอกจากนี้พบอีกว่าตัวอย่างที่ทดแทนเถ้าหนักไม้ยางพารามีเพียงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ 0.60 และ 0.70 ที่ใช้หินฝุ่นเพียงอย่างเดียวที่ 0.50 และ 0.60 สามารถผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงโดยไม่มีตำหนิ

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีส่วนผสมมวลรวมหินฝุ่นและเถ้าหนักไม้ยางพารา

อัตราส่วนผสม	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ความสามารถในการขึ้นรูป
1:6-100:0-0.5				ไม่มีตำหนิ
1:6-100:0-0.6				มีรอยร้าว
1:6-100:0-0.7				มีรอยร้าว
1:6-75:25-0.5				มีรอยผิวกะเทาะ
1:6-75:25-0.6				ไม่มีตำหนิ

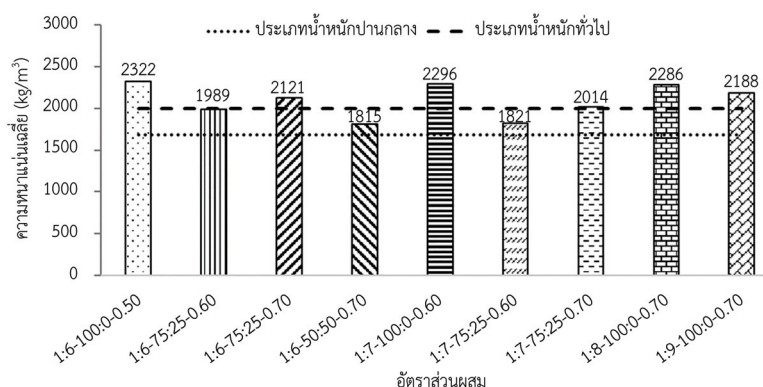
ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีส่วนผสมมวลรวมหินฝุ่นและเถ้าหนักไม่ยางพารา (ต่อ)

อัตราส่วนผสม	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ความสามารถในการขึ้นรูป
1:6-75:25-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:6-50:50-0.5				ไม่สามารถขึ้นรูปได้
1:6-50:50-0.6				มีรอยผิวกะเทาะ
1:6-50:50-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:7-100:0-0.5				มีรอยผิวกะเทาะ
1:7-100:0-0.6				ไม่มีตำหนิ
1:7-100:0-0.7				มีรอยร้าว
1:7-75:25-0.5				มีรอยผิวกะเทาะ
1:7-75:25-0.6				ไม่มีตำหนิ
1:7-75:25-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:8-100:0-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:8-75:25-0.7				มีรอยผิวกะเทาะ
1:9-100:0-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:9-75:25-0.7				มีรอยผิวกะเทาะ

3. ผลทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลวง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าหนักลงไป ในคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักจะทำให้ความหนาแน่นน้อยลง เมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่มีหินฝุ่นเป็นวัสดุผสม เพียงอย่างเดียว สาเหตุที่ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงเนื่องจากสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าหินฝุ่น และเป็นเหตุผลทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลวง (Kroehong et al., 2016; Torkittikul et al., 2017) ดังรูปที่ 4 และพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลวง 2 ประเภท ตามมาตรฐานมอก. 58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คือ

- 1) ความหนาแน่นประเภทรูปร่างหน้าทัวไป ($\rho \geq 2000$) มีทั้งสิ้น 6 อัตราส่วนผสม คือ 1:6-100:0-0.50 1:6-75:25-0.70 1:7-100:0-0.60 1:7-75:25-0.70 1:8-100:0-0.70 และ 1:9-100:0-0.70 พบว่าส่วนใหญ่ อัตราส่วนผสมที่มีความหนาแน่นทั่วไปจะเป็นตัวอย่างของคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีส่วนผสมของหินฝุ่นต่อเถ้าหนักไม่ย่างพารา 100:0 มีเพียง 2 อัตราส่วนผสมที่มีเถ้าหนักทดแทนหินฝุ่นคือ 75:25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.70 เท่านั้น
- 2) ความหนาแน่นประเภทรูปร่างหน้าทัวปานกลาง ($1680 \leq \rho < 2000$) มีทั้งสิ้น 3 อัตราส่วนผสมคือ 1:6-75:25-0.60 1:6-50:50-0.70 และ 1:7-75:25-0.60 พบว่าทุกอัตราส่วนของคอนกรีตบล็อกกลวงมีเถ้าหนักทดแทนหินฝุ่น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมที่มีความหนาแน่นของเถ้าหนักมีค่าน้อยกว่าหินฝุ่น



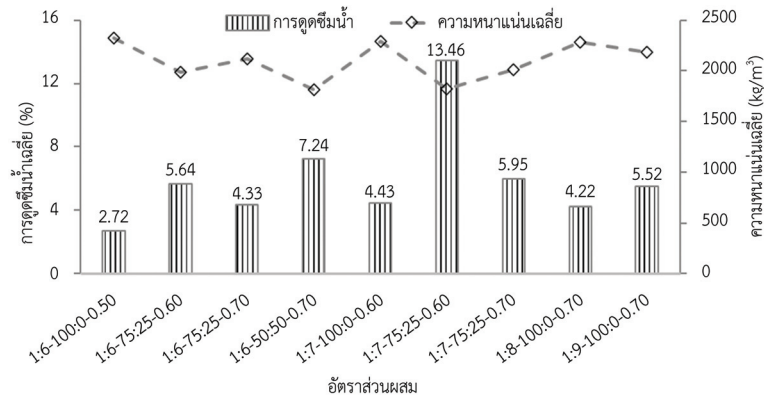
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m^3) และอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตบล็อกกลวง

4. การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

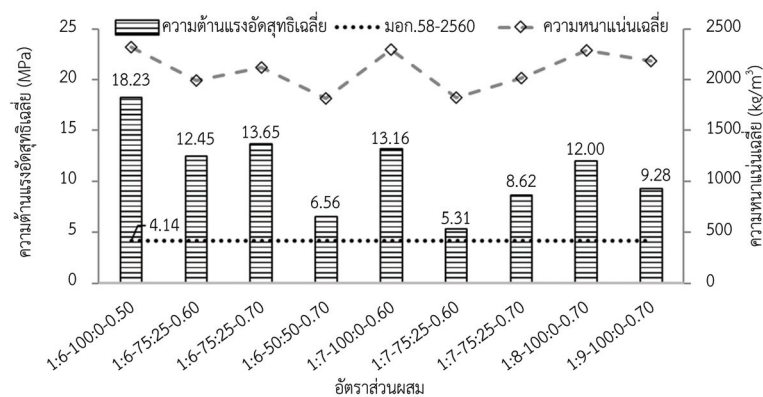
การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมีค่าอยู่ระหว่าง 13.46 - 2.72 % ดังรูปที่ 5 พบว่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นลดลง (Riaz et al., 2020; Vimuttasoongviriya, 2022; Phohirun et al., 2023) เพิ่มอัตราส่วนของมวลรวมจากเถ้าหนักทดแทนหินฝุ่นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเพิ่ม โดยที่อัตราส่วน 1:7-75:25-0.60 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน 1:6-50:50-0.70 1:6-75:25-0.70 1:7-75:25-0.60 และ 1:7-75:25-0.70 ตามลำดับ และพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ 0.50 และ 0.60 การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับที่ 0.70 ของคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมเถ้าหนัก และคอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมเพียงหินฝุ่น มีค่าการดูดซึมน้ำจะแปรผันตามอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม และน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Kroehong et al., 2016) ทั้งนี้การดูดซึมน้ำทุกอัตราส่วนผสมมีค่าน้อยกว่า 25 % ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2533 (Thai Industrial Standards Institute, 1990) แม้ว่าปัจจุบัน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) ไม่มีข้อกำหนดเรื่องการดูดซึมน้ำแล้วนั้น ในการพิจารณาถึงการใช้อาคารควรศึกษาค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อปัญหาการดูดซึมน้ำสูงจะมีผลต่อปัญหาการแตกร้าวของปูนก่อและฉาบได้

5. ความต้านทานแรงอัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

การทดสอบความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกทั้ง 9 อัตราส่วน ดังรูปที่ 6 มีค่ามากกว่า 4.14 MPa ตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 5.31 - 18.23 MPa และพบว่าความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยจะแปรผันตามปริมาณอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม โดยความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นตามค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น (Jarunvorakunvong et al., 2023; Khamput et al., 2024) ทั้งที่มีและไม่มีมวลรวมจากเถ้าหนักไม่ย่างพาราเป็นส่วนผสม และการดูดซึมน้ำของเถ้าหนักไม่ย่างพาราที่มีค่าสูงทำให้ปริมาณน้ำในคอนกรีตบล็อกหายไป ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และส่งผลความต้านทานแรงอัด (Choosakul and Yongsata, 2018; Jarunvorakunvong et al., 2023)



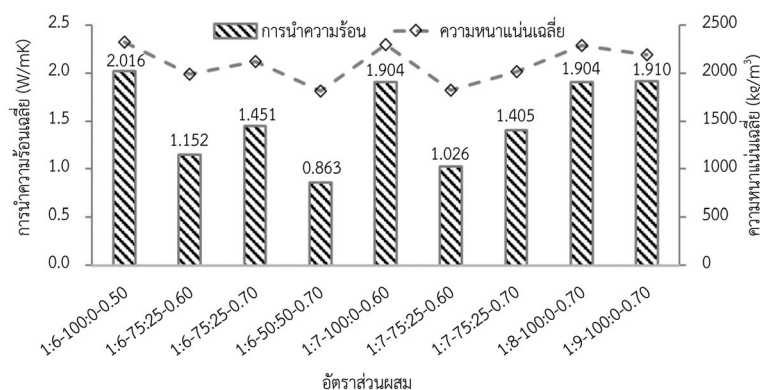
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำ (%) และอัตราส่วนผสมต่าง ๆ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยและอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

6. การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

การทดสอบค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกทั้ง 9 อัตราส่วนผสม ดังรูปที่ 7 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.863 - 2.016 W/mK พบว่าปริมาณส่วนผสมของเถ้าห่านกมีผลต่อการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือกล่าวได้ว่าเถ้าห่านกมีผลทำให้คอนกรีตบล็อกดังกล่าวมีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าห่านกเป็นวัสดุที่มีความพรุนและช่องว่างจำนวนมาก ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี (Kroehong et al., 2016; Khamput et al., 2024) โดยคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสม 50:50 มีปริมาณเถ้าห่านกมากที่สุดเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ โดยการนำความร้อนเฉลี่ยแปรผันกับความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักและอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

บทสรุป

การวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เถ้าหนักไม้ยางพาราทดแทนหินฝุ่นในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก โดยมุ่งเน้นการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าหนักไม้ยางพาราทดแทนหินฝุ่นทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลวงทุกอัตราส่วนผสม และสามารถทดแทนได้ร้อยละ 25 และ 50 ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตอปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม
2. สมบัติทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวงที่ใช้เถ้าหนักแทนหินฝุ่นผ่านมาตรฐาน มอก. 58-2560 โดยมีความต้านทานแรงอัดสุทธิมีค่าความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยมากกว่า 4.14 MPa ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐาน
3. คอนกรีตบล็อกที่มีการผสมเถ้าหนักมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้หินฝุ่นเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเหมาะสำหรับการใช้งานในอาคารที่ต้องการลดการถ่ายเทความร้อน
4. การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าหนักแทนหินฝุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตามมาตรฐาน

จากผลการวิจัยสามารถยืนยันได้ว่าการนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาใช้ในคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก เป็นแนวทางการส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมชีวมวลอย่างยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

1. คณะผู้วิจัยเสนอแนะให้มีการเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วย หรือการวิเคราะห์ผลตอบแทนต่อการลงทุน (ROI) หากสามารถศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ได้จะช่วยให้เกิดการนำไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์
2. การประเมิน Life Cycle Assessment (LCA) เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทดลองก่อสร้างจริง เช่น สร้างผนังทดลอง หรือก่อเป็นอาคารเล็ก ๆ เพื่อประเมินพฤติกรรมในสภาพแวดล้อมจริง จะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นและความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย
3. สามารถพัฒนาแนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้งร่วมกัน เช่น เถ้าหนักไม้ยางพารากับเถ้าปาล์ม หรือวัสดุชีวมวลอื่น ๆ เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น
4. การวิจัยใช้เถ้าหนักไม้ยางพารามาจากโรงไฟฟ้าแห่งเดียวในจังหวัดสงขลา ซึ่งอาจมีข้อจำกัดด้านคุณสมบัติของเถ้าหนักที่แปรผันตามแหล่งที่มา อาจไม่สามารถนำไปอ้างอิงใช้กับแหล่งเถ้าหนักอื่นได้โดยตรง เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าอาจแปรผันตามอุณหภูมิการเผา ชนิดไม้ และระบบเตาเผา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัย จากกองทุนวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 และขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สนับสนุนห้องปฏิบัติการในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณบริษัท พาเนล พลาสติก จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณนางสาวพรลภัส พลสวัสดิ์ นายวิชิต คงสม และนายฟาลิต หมดมาสัน นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ช่วยให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM.
- Chatveera, B., Makul, N. and Ruxsadee, B. (2004). Use of Unground Rice Husk Ash in Concrete Block Production. *KMUTT Research and Development Journal*, 27(4), 483-496. (in Thai)

- Choosakul, C. and Yongsata, K. (2018). Compressive Strength of Mortar Using the Mineral Dust Partial Replacement in Sand. *RMUTSV Research Journal*, 10(2), 324-332. (in Thai)
- Choosakul, C. and Yongsata, K. (2022). The Utilization of Construction Waste in Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Unit. *Recent Science and Technology*, 14(2), 430-440. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/245999/174711> (in Thai)
- Chumprom, P., Charoennatkul, C., Boonrasi, P., Laksanakit, C., Swasdi, S., Sookmanee, P. and Thongkun, T. (2024). The Feasibility of Using Rubberwood Bottom Ash in the Mixture of Interlocking Block. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(1), 15-26. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/254604/172132> (in Thai)
- Dasaesamoh, A., Maming, J., Radeang, N. and Awae, Y. (2011). Physical Properties and Mechanical Properties of Para Rubber Wood Fly Ash Brick. *Journal of Yala Rajabhat University*, 6(1), 25-35. (in Thai)
- Gupta, T., Kothari, S., Siddique, S., Sharma, R.K. and Chaudhary, S. (2019). Influence of Stone Processing Dust on Mechanical, Durability and Sustainability of Concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 918-927. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.188>
- Hendry, E.A.W. (2001). Masonry Walls: Materials and Construction. *Construction and Building Materials*, 15(8), 323-330. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00019-8)
- Jarunvorakunvong, A., Choosit, P., Nilas, N., Wikrantanon, P. and Taweeaugornphun, S. (2023). Product of Light Weight Concrete Block Mixed with Ceramic Waste from Industry for Green Building Construction. *Journal of Technical Education Development*, 35(125), 119-128. <https://so09.tci-thaijo.org/index.php/jted/article/view/1668/797> (in Thai)
- Khamput, P., Choosakul, C., Klathae, T., Rittipakdee, S. and Monkeaw, S. (2024). Product of Hollow Concrete Blocks Mixed with Rice Husk Ash and Cassava Fermentation Waste. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 27(5), e253838. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal/article/view/253838/171143> (in Thai)
- Klathae, T., Sornpakdee, N., Buathongkhue, C. and Deedard, N. (2020). Utilization of Parawood Ash in Concrete Paving Blocks. *RMUTSV Research Journal*, 12(1), 36-48. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/241931/165048> (in Thai)
- Kroehong, W., Sangpaen, S., Sitkanarak, P. and Wilairat, J. (2016). Mechanical Properties, Microstructure and Thermal Conductivity of Concrete Block Containing Fly Ash. *KMUTT Research and Development Journal*, 39(3), 407-425. (in Thai)
- Kuasakul, T., Charoennatkul, C. and Lukjan, A. (2017). Engineering Properties of Interlocking Blocks Containing Rubber Wood Ash of a Fishmeal Factory. In The 14th National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference (The 14th KU-KPS) Conference. 384-392. (in Thai)
- Kumlom, T. and Nanthabut, N. (2020). Opinions About the Impact of Quarry on Nearby Communities, Takua Thung District, Phang Nga Province. *Research and Development Journal Suan Sunandha Rajabhat University*, 12(1), <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/irdssru/article/view/243996/165790> (in Thai)

- Laksanakit, C., Swasdi, S., Tabyang, W., Chusilp, N., Kuasakul, T., Thongkun, T., Kongphet, N., Petchdee, T. and Naemsai, T. (2023). Effect of Rubberwood Fly Ash on Thermal Conductivity of Cement Fiber Board. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 16(3), 51-65. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/254443/171751> (in Thai)
- Phohirun, S., Kanbua, P. and Intaboot, N. (2023). Properties of Concrete Mixed with Recycled Crumb Rubber-Tires. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 16(1), 28-37. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/250962/170608> (in Thai)
- Riaz, M.H., Khitab, A., Ahmad, S., Anwar, W. and Arshad, M.T. (2020). Use of Ceramic Waste Powder for Manufacturing Durable and Eco-Friendly Bricks. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21, 243-252. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00205-2>
- Saengarhit, S. (2013). The Optimal Cement-to-Stone Dust Ratio for Concrete Block Production. *Journal of the Thailand Concrete Association*, 20, 1-5. <https://thaitca.or.th/wp-content/uploads/2020/04/journal20.pdf> (in Thai)
- Sukontasukkul, P. (2013). *Concrete* (2nded.). Wankawee Publishing. (in Thai)
- Tanpaiboonkul, N. (2017). Replacing Cement by Dust from Rock Crushing Plant in Interlocking Block Production. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 9(1), 126-135. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pnujr/article/view/65468/61108> (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (1974). *TIS 109-1974: Standard for Sampling and Testing Concrete Masonry Unit*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (1990). *TIS 58-2533: Hollow Non-Load Bearing Concrete Masonry Unit*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2013). *TIS Standard 2594-2556: Hydraulic Cement*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2017). *TIS Standard 58-2560: Hollow Non-Load Bearing Concrete Masonry Unit*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thammasri, W., Aonpadcha, N., Peenok, U. and Srithomgkam, M. (2022). Utilization of Waste Materials from Coconut to Production of Concrete Blocks. *Academic Journal Uttaradit Rajabhat University*, 17(1), 117-129. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/uruj/article/view/245795/168670> (in Thai)
- Thongkhan, T., Laksanakit, C., Chusilp, N., Tabyang, W., Lukjan, A., Sookmanee, P., Iyaruk, A., Kuasakul, T. and Chumprom, P. (2024). The Strength of Cement Mortar with Industrial Rubberwood Fly Ash. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(1), 1-14. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/254602/172125> (in Thai)
- Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W. and Chaipanich, A. (2017). Utilization of Coal Bottom Ash to Improve Thermal Insulation of Construction Material. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 305-317. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0419-2> (in Thai)
- Vimuttasoongviriya, C. (2022). A Study on the Properties of Non-Load-Bearing Concrete Blocks Mixed with Biomass Fly Ash in Buriram Province. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, 10(1), 1-15. (in Thai)