

การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศผสมขี้เถ้าแกลบและขวดแก้วรีไซเคิลตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

Development of aerated lightweight concrete incorporating rice husk ash and recycled glass bottles under the circular economy approach

ธรรพร บุศย์น้ำเพชร^{1*} นิพนธ์ ตันไพบูลย์กุล¹ และธีรศิริ เกิดทอง¹

Tharaporn Budnumpetch^{1*} Nipon Tanpaiboonkul¹ and Thiansiri Kertthong

Received: 6 June 2025 ; Revised: 4 August 2025 ; Accepted: 2 September 2025

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและชุมชน เช่น ขี้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลและเศษแก้วจากของเสียชุมชนเมือง ส่งผลให้เกิดปัญหาทั้งด้านการจัดการของเสียและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลือง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของวัสดุดังกล่าวในการพัฒนาเป็นองค์ประกอบของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยมุ่งเน้นการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและองค์ประกอบที่เหมาะสม ผ่านการประเมินสมบัติเชิงกายภาพและกลของคอนกรีต ได้แก่ ค่ากำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ระดับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าแกลบในอัตรา 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก การใช้ผงอลูมิเนียมในอัตรา 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ และการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแก้วบดในช่วง 0–100 เปอร์เซ็นต์ ของมวลรวมละเอียด

ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6 ขี้เถ้าแกลบ 30 เปอร์เซ็นต์ผงอลูมิเนียม 1.0 เปอร์เซ็นต์ และเศษแก้วบดแทนทราย 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด โดยคุณสมบัติหลังบ่มตัวอย่าง 28 วันมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 5.53 เมกะพาสคาล ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองชนิด C12 (≥ 2.5 MPa) ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,070 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อยู่ในช่วงที่กำหนดสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองชนิด C12 (1,001–1,200 kg/m³) และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 24.97 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย (≤ 23 เปอร์เซ็นต์) แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงและอาจยอมรับได้สำหรับการใช้งานทั่วไป โดยเฉพาะในบริบทที่ไม่เน้นการสัมผัสน้ำโดยตรง ดังนั้นผลการศึกษานี้สะท้อนถึงแนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้งเพื่อทดแทนทรัพยากรก่อสร้างธรรมชาติอย่างยั่งยืน ลดการพึ่งพาซีเมนต์และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตลอดจนสามารถต่อยอดสู่ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบาเติมฟองอากาศ, ขี้เถ้าแกลบ, เศษแก้วบดรีไซเคิล, วัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน, เศรษฐกิจหมุนเวียน

Abstract

The increasing amount of agricultural and municipal waste, such as rice husk ash from biomass power plants and glass cullet from urban solid waste, raises concerns regarding waste management and the depletion of natural resources. This study aims to investigate the potential of these waste materials as components in aerated lightweight concrete by optimizing the water-to-binder ratio and mix proportions. The physical and mechanical properties evaluated include compressive strength, bulk density, and water absorption. The experimental design includes water-to-binder (w/b) ratios of 0.4, 0.5, 0.6, and 0.7; cement replacement with rice husk ash at 0, 10, 20, and 30% by weight; aluminum

¹ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University

* Corresponding author: Tharaporn Budnumpetch, Email: btharaporn.b@msu.ac.th

powder at 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0%; and fine aggregate replacement with recycled glass cullet ranging from 0 to 100% by weight.

The optimal mix is identified as having a w/b ratio of 0.6, 30% rice husk ash, 1.0% aluminum powder, and 80% recycled glass cullet by weight of fine aggregate. After 28 days of curing, the mix achieves a compressive strength of 5.53 MPa, which exceeds the minimum requirement for Type C12 aerated concrete specified in TIS 2601-2556 (≥ 2.5 MPa). The bulk density is 1,070 kg/m³, which falls within the standard range for Type C12 (1,001–1,200 kg/m³). The water absorption is 24.97%, which slightly exceeds the standard limit ($\leq 23\%$) but remains within an acceptable range for practical use, particularly in applications without direct moisture exposure. Overall, the findings highlight the potential of utilizing agricultural and municipal waste as sustainable alternatives to conventional construction materials, contributing to cement reduction, greenhouse gas mitigation, and the development of environmentally friendly construction products.

Keywords: Aerated lightweight concrete, rice husk ash (RHA), recycled glass sand, sustainable construction materials, circular economy

บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในภาคเศรษฐกิจที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติมากที่สุด และเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกลำดับต้นของโลก โดยเฉพาะกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของการปล่อยคาร์บอน ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ของโลก (Hasanbeigi *et al.*, 2024) ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวโน้มในการพัฒนา “วัสดุก่อสร้างทางเลือก” โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตรเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แนวคิด BCG (Bio-Circular-Green Economy) ซึ่งเป็นนโยบายระดับชาติของไทยส่งเสริมการใช้ทรัพยากรชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ การหมุนเวียนวัสดุ และการใช้ประโยชน์จากของเสีย โดยมีเป้าหมายในการยกระดับวัสดุเหลือใช้ให้สามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างยั่งยืน (ฝ่ายสื่อสารและภาพลักษณ์องค์กร, 2563) สำหรับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) นั้นให้ความสำคัญกับการออกแบบกระบวนการผลิตโดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ลดการใช้วัสดุใหม่ และเพิ่มการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุที่หมดอายุการใช้งาน แนวคิดนี้สามารถประยุกต์ใช้โดยเฉพาะในภาคการก่อสร้าง ผ่านการเลือกใช้วัสดุทดแทนจากของเสีย เช่น ขี้เถ้าแกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตพลังงานชีวมวล และเศษแก้วจากขยะชุมชนเมืองหรือวัสดุอื่นซึ่งหากนำวัสดุเหล่านี้กลับมาใช้แทนปูนซีเมนต์หรือทรายได้ก็สามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และบรรเทาผลกระทบจากการทำเหมืองและจากการขนส่งวัสดุใหม่ได้อย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองที่มีความยั่งยืนทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากร

ในบริบทของประเทศไทยซึ่งเป็นหนึ่งในผู้ส่งออกข้าวรายสำคัญของโลก มีการผลิตแกลบและขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash: RHA) เป็นจำนวนมากจากกระบวนการสีข้าวและการเผาเพื่อผลิตพลังงานชีวมวล ขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาอย่างเหมาะสมจะมีปริมาณซิลิกาสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงสมบัติปอซโซลานที่ดี (Ganesan *et al.*, 2008) ซึ่ง Endale (2023) รายงานว่าการใช้ขี้เถ้าแกลบ เป็นวัสดุทดแทนในคอนกรีต สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตได้ ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงอัดและความทนทานของคอนกรีต ทศรียา กลิ่นขจร และคณะ (2565) สรุปว่าขี้เถ้าแกลบสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ด้วยการเป็นวัตถุดิบผลิตอิฐมวลเบาและสัดส่วนของขี้เถ้าแกลบ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สามารถใช้ในการผลิตอิฐก่อผนังหรือกันห้องภายในอาคารได้ ขณะที่ ประชุม คำพุ่ม และทวีข กกล้าแท้ (2565) พบว่า การทำคอนกรีตบล็อกโดยมีขี้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมมีค่าผ่านเกณฑ์ มอก. 58-2533

เศษแก้วสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ทั้งในรูปของผงละเอียด (Glass Powder: GP) หรือเม็ดหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงทรายธรรมชาติ โดยผงแก้วที่มีปริมาณซิลิกาสูงจะมีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน Aliabdo *et al.* (2016) รายงานว่าผงแก้วสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้โดยไม่ลดความทนทานของคอนกรีต ขณะที่ Nassar and Soroushian (2011) พบว่าผงแก้วที่บดละเอียดให้ผลด้านโครงสร้างในภาคสนามใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ นอกจากการใช้แทนปูนซีเมนต์แล้วเศษแก้วที่ผ่านการบดยังสามารถใช้แทนทรายธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Taha and Nounu (2008) พบว่าการแทนทรายด้วยเศษแก้วบดสามารถรักษาค่ากำลังอัดของคอนกรีตไว้ได้ และช่วยลดการดูดซึมน้ำ

เมื่อควบคุมขนาดการบดอย่างเหมาะสม ส่วน Muhedin and Ibrahim (2023) ระบุว่าการใช้เศษแก้วแทนทรายสามารถลดความหนาแน่นของคอนกรีตและยังคงสมบัติเชิงกลที่ดี เหมาะกับงานก่อสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา แม้ว่างานวิจัยส่วนหนึ่งจะเน้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ แต่การใช้เศษแก้วทดแทนทรายโดยตรงก็ถือเป็นแนวทางที่ตอบโจทย์ของแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดผลกระทบจากกระบวนการผลิตขวดแก้วที่ใช้ความร้อนสูงและการขนส่งทรัพยากรได้

จากแนวโน้มดังกล่าว การใช้เศษแก้วบดละเอียดร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น ซีเมนต์กลบ หรือเศษแก้วบดขนาดเท่าทรายเพื่อทำเป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ โดยเฉพาะเมื่อใช้ผงอลูมิเนียมเป็นตัวก่อฟองเพื่อลดความหนาแน่น (Van et al., 2019; ณรงค์ศักดิ์ เ็นประเสริฐ และอาทิมา ดวงจันทร์, 2564) โดยผงอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นสารก่อให้เกิดการขยายตัวอัตราการใช้ประมาณ 5-8 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร จึงกล่าวได้ว่าการนำวัสดุเหลือทิ้งที่มีสมบัติเหมาะสมนั้นสามารถประยุกต์ใช้ทดแทนวัสดุหลักได้ตามแนวทางการใช้วัสดุทดแทนในระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนเพื่อความยั่งยืน สามารถประยุกต์ต่อยอดในการพัฒนามาตรฐานคอนกรีตมวลเบาได้ โดยทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ที่กำหนดระดับชั้นของคอนกรีตมวลเบาเพื่อความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของการใช้ซีเมนต์กลบร่วมกับเศษแก้วบดจากขยะรีไซเคิลเพื่อใช้แทนที่ทรายบางส่วนและผงอลูมิเนียมในคอนกรีตมวลเบา โดยเน้นการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำเพื่อสนับสนุนการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ทั้งยั่งยืนและมีประสิทธิภาพทางวิศวกรรมต่อไปโดยอ้างอิงเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองชนิด C9-C12 เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างเหมาะสมต่อไป

การทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมวัสดุ การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุเบื้องต้น การออกแบบอัตราส่วนผสม และการทดสอบสมบัติคอนกรีตมวลเบา ดังนี้

1. การเตรียมวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน), ซีเมนต์กลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลในจังหวัดร้อยเอ็ด,

ขวดแก้วสีเขียวจากบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ปูนขาวจากโรงงานโกวิทปูนขาว จังหวัดสระบุรี, ทรายก่อสร้างในจังหวัดมหาสารคาม, ผงอลูมิเนียมจากบริษัท HIMEDIA และน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาค นำวัสดุหลักได้แก่ ทรายเศษขวดแก้วไปอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM C511 จากนั้นทำการบดเศษแก้วให้มีขนาดเล็ก ร่อนซีเมนต์กลบผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมครอน) ส่วนทรายและเศษแก้วบดผ่านตะแกรงเบอร์ 35 (ขนาด 500 ไมครอน) ด้วยเครื่องร่อนแบบสันตามมาตรฐาน ASTM C136

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุ

การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุเบื้องต้นประกอบด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์กลบ เศษแก้วบด และทราย ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) โดยใช้เครื่องรุ่น XGT-5200 ด้วยวิธี Standardless Method ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ ได้ดำเนินการวัดค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 2-2521 โดยใช้เครื่องมือประเภท Pycnometer และวัดค่าการดูดซึมน้ำตามวิธีการของ ASTM C642 (ASTM International, 2021b) โดยแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ได้วิเคราะห์ขนาดคละของวัสดุและคำนวณค่าดัชนีความละเอียด (Fineness Modulus) ตามมาตรฐาน ASTM C136 (ASTM International, 2019a) และตรวจสอบลักษณะผิวของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงแบบตั้งโต๊ะ (upright light microscope) ของบริษัท Carl Zeiss (ประเทศเยอรมนี) รุ่น Axiostar Plus ซึ่งติดตั้งเลนส์วัตถุกำลังขยาย 100 เท่า ($100\times$ oil immersion) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3. การออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

การออกแบบอัตราส่วนผสมเพื่อพัฒนาคอนกรีตมวลเบาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่

3.1 ขั้นตอนแรก ใช้อัตราส่วนพื้นฐานของวัสดุผสม

คอนกรีตมวลเบาที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 40, ปูนขาว 10 และทราย (มวลรวมละเอียด) 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (ธพร บุศย์น้ำเพชร และนิพนธ์ ดันไพบลย์กุล, 2559) เพื่อศึกษาปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (water-to-binder ratio, w/b) ที่ระดับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 รวมถึงการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์กลบในระดับ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยควบคุมสัดส่วนของปูนขาวและ

ทรายไว้ที่ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ตัวอย่างคอนกรีตในขั้นตอนนี้ผสมด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ขนาด 20 ลิตร ตามมาตรฐาน ASTM C305 (ASTM International, 2021a) เทลงแบบหล่อขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร จากนั้นวางบนโต๊ะสั่น 1 นาทีเพื่อไล่ฟองอากาศ และทำการบ่มในห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 95 ที่อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำมาทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิในขั้นตอนถัดไป

3.2 ขั้นตอนที่สอง ศึกษาผลของการเติมผงอลูมิเนียมในระดับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนที่ได้จากขั้นตอนแรกและยังคงสัดส่วนของปูนขาวและทรายไว้ที่ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การผสมและขึ้นรูปตัวอย่างดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนแรก การทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วันใช้เพื่อประเมินผลของการเติมผงอลูมิเนียมที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล ก่อนเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขั้นตอนต่อไป

3.3 ขั้นตอนที่สาม ศึกษาผลของการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วดละเอียดในระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด โดยควบคุมให้ปริมาณรวมของมวลรวมละเอียด (ทราย + เศษแก้วด) เท่ากับ 50 และคงสัดส่วนปูนขาวไว้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก อัตราส่วนที่ใช้ในขั้นนี้ใช้ค่า w/b ปริมาณซีเมนต์แกลบ และปริมาณผงอลูมิเนียมที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ก่อนนำไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน คัดเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ความสามารถในการขึ้นรูป และความสอดคล้องกับเกณฑ์ มอก. 2601-2556 ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วันต่อไป

4. การทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

การทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วยการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (ASTM International, 2020) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด TTR รุ่น TTR-080G บริษัทไทยธำรง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ขนาด 300 kN ความเร็วการโหลด 0.25 MPa/s มีหน่วยการวัดเป็นเมกะพาสคาล (MPa) การวัดค่าความหนาแน่นใช้วิธีการชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.01 กรัม และวัดขนาดตัวอย่างเพื่อใช้คำนวณปริมาตรด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ โดยคำนวณความหนาแน่นจากสมการ 1

$$\text{Density}(\text{kg/m}^3) = \text{Mass}(\text{kg})/\text{Volume}(\text{m}^3) \quad (1)$$

การดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C642 (ASTM International, 2021b) โดยแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C จนแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการแช่น้ำเพื่อคำนวณค่าการดูดซึมน้ำเป็นเปอร์เซ็นต์จากสมการที่ 2

$$\text{Water absorption (\%)} = ((w_s - w_d)/w_d) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ: w_s = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ

w_d = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

ข้อมูลทั้งหมดจะถูกเปรียบเทียบกับเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองประเภท C9-C16 เพื่อนำมาคัดเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลและกายภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

1. คุณสมบัติของวัสดุ

1.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของวัสดุ

จากการศึกษาความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมคอนกรีตมวลเบา ได้แก่ ซีเมนต์แกลบ เศษแก้วด และทราย ซึ่งผลการทดสอบแสดงใน Table 1

Table 1 Physical Properties of Raw Materials

Materials	Specific Gravity (g/cm ³)	Bulk Density (g/cm ³)	Water Absorption (percent)
Rice Husk Ash	1.58	1.57	4.23
Crushed Glass Waste	1.84	1.83	3.05
Fine Aggregate (Natural Sand)	2.28	2.27	1.75

จาก Table 1 พบว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3.15 g/cm³ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหากมีการนำไปใช้เป็นส่วนผสมนั้นสามารถลดน้ำหนักของคอนกรีตได้ ขณะที่เศษแก้วบดมีความหนาแน่น 1.83 g/cm³ ทราาย 2.27 g/cm³ ถึงแม้แก้วบรรจุภัณฑ์ต่างๆ นั้นผลิตจากทรายแก้ว แต่ก็ผ่านกระบวนการหลอมและเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี จึงทำให้ความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์นั้นลดลง จึงมีแนวโน้มช่วยลดความหนาแน่นของคอนกรีตที่มีส่วนผสมนี้ได้ (Ibrahim, 2020) สำหรับค่าการดูดซึมน้ำพบว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความหนาแน่นสูงที่สุดสัมพันธ์กับลักษณะรูพรุนภายในที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และพฤติกรรมการแข็งตัวของ

คอนกรีต (Manjunath *et al.*, 2017; Ganesan *et al.*, 2008; ประชุม คำพุ่ม และทวิช กล้าแท้, 2565)

1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้รับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ด้วยเครื่องมือรุ่น XGT-5200 ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงใน Table 2 ที่พบว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่มีปริมาณรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ตามเกณฑ์ของ ASTM C618 (ASTM International, 2019b) และซิลิกาที่ได้จากการเผาในช่วง 500–800°C มีลักษณะเป็นอสัญฐานเกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างมีประสิทธิภาพ

Table 2 Chemical Composition of Materials (percent by weight)

Materials	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZnO	SO ₃	CuO
Rice Husk Ash (RHA)	65.09	14.22	8.16	4.41	0.80	0.41	N.D.	N.D.
Crushed Glass Waste	42.86	1.04	39.39	9.44	1.41	0.08	0.14	0.08
Fine Aggregate (Natural Sand)	90.58	0.39	1.25	4.16	2.42	N.D.	N.D.	0.09

n.d. : not detected

(Bangwar *et al.*, 2017; Saad *et al.*, 2015) ส่วนเศษแก้วที่บดละเอียดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานซึ่งจะสร้างเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทำให้ภายในคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น (Poudel *et al.*, 2025; Zhou *et al.*, 2023)

1.3 ขนาดคลและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม

ทรายและเศษแก้วบดได้รับการวิเคราะห์ขนาดคลและค่าความหนาแน่นค่า Fineness Modulus (FM) โดยทรายมีค่า FM = 0.97 และเศษแก้วบด FM = 0.74 ซึ่งต่ำกว่าช่วงมาตรฐานของทรายทั่วไป (2.2–3.2) ค่า FM ต่ำแสดงถึงวัสดุที่ละเอียดมาก ซึ่งช่วยลดช่องว่างในโครงสร้างคอนกรีตทำให้อิทธิพลของ

มีความหนาแน่นและสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลดีต่อความสามารถในการขึ้นรูปและลดการแยกชั้นของเนื้อวัสดุ (Ige *et al.*, 2024; บุรณัฏฐ์ จันตรีระ และคณะ, 2554)

1.4 ลักษณะทางจุลภาคของวัสดุ

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เศษแก้วบด และทราย แสดงให้เห็นลักษณะรูปร่างผิวที่แตกต่างกันดัง Figure 1 จากภาพอธิบายได้ว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(a) มีผิวเรียบมีขนาดขนาดใหญ่และต้องการการบดให้มีขนาดละเอียดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาปอซโซลาน ในขณะที่เศษแก้วบด(b)มีลักษณะผิวหยาบ มีเหลี่ยมคม และทราย(c) มีเหลี่ยมคมน้อยกว่าเศษแก้วบด เมื่อวิเคราะห์ถึงรูป

ร่างและลักษณะของวัสดุตั้งกล่าวอาจส่งผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต มีการศึกษาจากนักวิจัยหลายท่านพบว่าวัสดุผิวหยาบ เช่น เศษแก้วดุนนั้นมีผลต่อการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวกับซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มความแข็งแรงได้มากขึ้น (Ichino *et al.*, 2024; Oluwasola *et al.*, 2020) ดังนั้นจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุของส่วนผสมทั้งซีเมนต์และเศษแก้วดุนหากนำไปผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงมีแนวโน้มของคุณสมบัติที่ดีได้ต่อไป

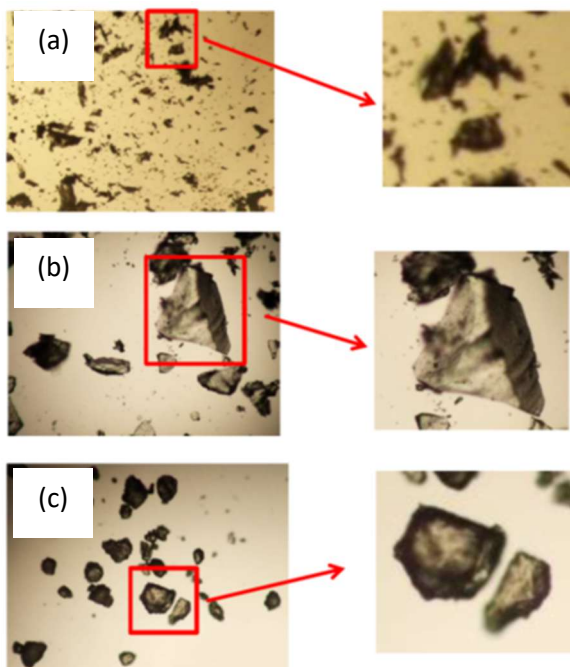


Figure 1 Microscopic images of (a) rice husk ash, (b) waste glass, and (c) sand at 100× magnification

2. การศึกษาค่ากำลังอัดเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเบื้องต้น

2.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และ (RHA) ร่วมกับการพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยทดสอบค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 7 วัน ภายใต้ระดับการแทนที่ RHA ที่ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และค่า w/b ที่ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ ดัง Figure 2

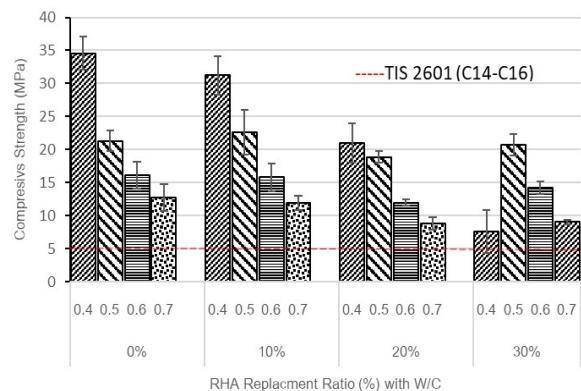


Figure 2 Compressive strength of lightweight concrete with varying rice husk ash (RHA) replacement ratios (0, 10, 20, and 30 by weight of cement) under different water-to-cement ratios at 7 days of curing.

ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และ (RHA) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เช่น ที่ w/b = 0.4 ค่ากำลังอัดลดลงจาก 34.54 ± 1.19 MPa (RHA 0) เหลือเพียง 7.59 ± 2.24 MPa (RHA 30) ซึ่งลดลงถึง 78 โดยเฉลี่ย และใน w/b = 0.6 ค่ากำลังอัดที่ RHA 30 ยังอยู่ที่ 14.20 ± 0.95 MPa แม้ว่าอัตราส่วนการแทนที่ 30 จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ที่ต่ำกว่า แต่ในทุกกรณียังคงมีค่ากำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำตาม มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาประเภทเติมฟอง (≥5 MPa สำหรับ C14-C16) โดยเฉพาะอัตราส่วนที่ w/b = 0.5 และ 0.6 ซึ่งมีค่ากำลังอัดที่ 20.71 ± 1.16 และ 14.20 ± 0.95 MPa ตามลำดับ ดังนั้น อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ อาจยังสามารถใช้ได้จริงในงานที่มุ่งเน้นการลดการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ แม้ว่าจะต้องแลกกับการลดลงของค่ากำลังอัด ทั้งนี้ควรเลือกใช้ค่า w/b ที่เหมาะสม (0.5–0.6) เพื่อรักษาสมดุลระหว่างความแข็งแรงและเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่าที่ระดับ RHA 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังอัดลดลงจาก 20.71 ± 1.16 MPa ที่ w/b 0.5 เป็น 14.20 ± 0.95 MPa และ 9.04 ± 0.36 MPa ที่ w/b 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแม้มีแนวโน้มลดลง แต่ค่าดังกล่าวยังเกินเกณฑ์ขั้นต่ำมาตรฐาน การลดลงของค่ากำลังอัดสามารถอธิบายได้จากการที่ w/b ที่สูงทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นส่งผลต่อความหนาแน่นที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Park *et al.* (2024) และ Aliabdo *et al.* (2016) ที่ชี้ว่าการควบคุมปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีผลอย่างยิ่งต่อโครงสร้างจุลภาคและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้

วัสดุพอลิโพรไพลีน เช่น RHA ในขณะที่การใช้ปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปก็ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงเช่นกัน ดังเช่นจาก Figure 2 ค่ากำลังอัดที่ w/b 0.4 นั้นมีค่า 7.59 ± 2.24 MPa ซึ่ง โชคชัย ไตรยสุทธิ์ (2564) ได้รายงานว่าหากเนื้อคอนกรีตมีความแห้งเกินไปหรือมีน้ำไม่เพียงพอในส่วนผสมส่งผลให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ทำให้ลดค่ากำลังอัดของคอนกรีตลงได้เช่นกัน ดังนั้นค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาทั้งจากการเปลี่ยนแปลง w/b และสัดส่วน RHA แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง โดยเฉพาะในอัตราส่วนที่ใช้ RHA สูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ w/b 0.5 หรือ 0.6 ซึ่งสามารถรักษาความแข็งแรงของคอนกรีตไว้ได้ในระดับมาตรฐานและสอดคล้องกับแนวคิด BCG Economy ในด้านการลดการใช้ปูนซีเมนต์แม้ว่าอัตราส่วน w/b = 0.7 จะยังให้ค่ากำลังอัดมากกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดใน มอก. 2601-2556 (≥ 5 MPa) แต่ค่ากำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จาก w/b = 0.5 และ 0.6 อย่างมีนัยสำคัญ (ลดลงประมาณ 42.25 และ 26.13 เปอร์เซ็นต์) อีกทั้งอัตราส่วนน้ำที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดโพรงอากาศและความพรุนที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตลดลง

2.2 ปริมาณผงอลูมิเนียมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบา

จากผลการทดลองในหัวข้อ 2.1 ค้นพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มีค่ากำลังอัดเหมาะสมคือ 0.5 และ 0.6 ร่วมกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเถ้าแกลบ 30 เปอร์เซ็นต์ จึงนำอัตราส่วนดังกล่าวมาศึกษาพร้อมกันกับปริมาณผงอลูมิเนียมที่ใช้ในอัตรา 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อวิเคราะห์ค่ากำลังอัดและค่าความหนาแน่นที่อายุบ่ม 7 วัน

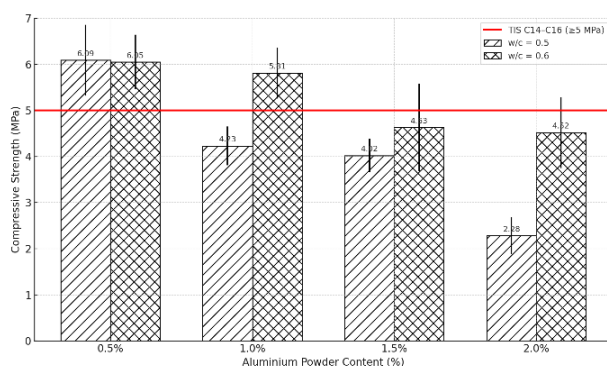


Figure 3 Compressive strength of lightweight concrete with aluminium powder contents of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 at w/b ratios of 0.5 and 0.6 after 7 days of curing.

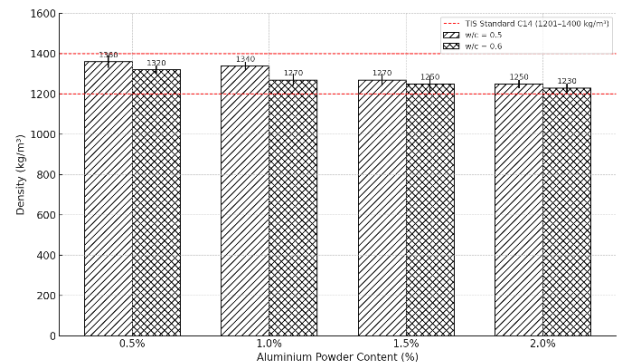


Figure 4 Density of lightweight concrete with aluminium powder contents of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 at w/b ratios of 0.5 and 0.6 after 7 days of curing.

จาก Figure 3 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมผงอลูมิเนียมในช่วง 0.5–2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ภายใต้ค่า w/b ที่ระดับ 0.5 และ 0.6 พบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น โดยที่ w/b เท่ากับ 0.5 ค่ากำลังอัดลดลงจาก 6.09 MPa ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 2.28 MPa ที่ 2.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเท่ากับลดลงประมาณ 62.6 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ที่ w/b เท่ากับ 0.6 กำลังอัดลดลงจาก 6.05 MPa เหลือ 4.52 MPa คิดเป็นการลดลงประมาณ 25.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากผงอลูมิเนียมต่อกำลังอัดจะเด่นชัดขึ้นเมื่อค่า w/b ต่ำ การลดลงของกำลังอัดสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนและทำให้เกิดฟองอากาศ ส่งผลให้ความพรุนในคอนกรีตเพิ่มขึ้น โครงสร้างอ่อนตัว และความแข็งแรงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam *et al.* (2021) และ Ferhat *et al.* (2023) ที่พบว่าปริมาณผงอลูมิเนียมที่สูงทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อกำลังอัด สำหรับกรณีค่า w/b ที่ 0.7 แม้ค่ากำลังอัดที่ได้ยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ (ตาม Figure 2) แต่กลับแสดงแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับค่าที่ต่ำกว่า จึงไม่เหมาะที่จะเลือกเป็นสูตรผสมที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เป็นผลจากการใช้น้ำในปริมาณที่สูงเกินไป ซึ่งส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีโครงสร้างที่หลวมตัวและความสามารถในการรับแรงลดลง

จาก Figure 4 พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เปอร์เซ็นต์ เป็น 2.0 เปอร์เซ็นต์ ทั้งในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5 และ 0.6 โดยที่ w/b = 0.5 ความหนาแน่นลดลงจาก 1,360 kg/m³ เหลือ 1,250 kg/m³ คิดเป็นการลดลงประมาณ 8.1 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ w/b = 0.6 ความหนาแน่นลดลงจาก 1,320 kg/m³ เหลือ 1,230 kg/m³

m³ หรือประมาณ 6.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ ที่ก่อให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนจำนวนมากและสร้างโพรงอากาศภายใน ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงอย่างชัดเจน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Islam *et al.* (2021) และ Ferhat *et al.* (2023) ที่ระบุว่าความหนาแน่นของคอนกรีตเซลลูลาร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดในงานวิจัยนี้ยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนดโดย มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาชนิด C14 (1,201–1,400 kg/m³) จึงสามารถกล่าวได้ว่าการควบคุมปริมาณผงอลูมิเนียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะช่วยรักษาคุณสมบัติด้านน้ำหนักเบาได้โดยไม่กระทบต่อคุณภาพเชิงโครงสร้างของคอนกรีตและสอดคล้องกับเป้าหมายของคอนกรีตมวลเบาในการลดน้ำหนักโครงสร้างโดยไม่กระทบความสามารถในการรับแรงมากนัก

2.3 อัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบดสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสม

การทดลองนี้ศึกษาผลของการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแก้วบดในระดับ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น ได้แก่ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์เกรด 30 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 และเติมผงอลูมิเนียม 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบกำลังอัดหลังบ่ม 7 วัน (Figure 5) พบว่า การเพิ่มปริมาณเศษแก้วบดจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 7.31 MPa เป็น 8.81 MPa หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 20.5 เปอร์เซ็นต์ ก่อนจะลดลงเล็กน้อยที่ 80 เปอร์เซ็นต์ (7.91 MPa) และ 100 เปอร์เซ็นต์ (7.15 MPa) แต่ยังคงสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดใน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตประเภท C14-C16 (≥ 5.0 MPa) แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วง 20-60 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดจากอนุภาคของเศษแก้วที่มีขนาดเล็กเคียงทรายสามารถแทรกตัวและเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างคอนกรีตได้ดี ทำให้เกิดความหนาแน่นระดับจุลภาคที่สูงขึ้น และเกิดการอัดแน่นระหว่างอนุภาคโดยไม่รบกวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับ Taha and Nounu (2008) และ Nassar and Soroushian (2011) ที่รายงานว่า การใช้เศษแก้วบดแทนทรายสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่ออยู่ในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการแทนที่ทรายเกิน 60 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังอัดเริ่มลดลงราว 18.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง 60 เปอร์เซ็นต์ (8.81 MPa) กับ 100

เปอร์เซ็นต์ (7.15 MPa) ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของวัสดุเฉื่อยที่ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของวัสดุ และความพรุนของเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Muhedin and Ibrahim (2023) ที่ชี้ว่าการใช้เศษแก้วบดในระดับสูงอาจส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงโครงสร้างหากไม่มีการควบคุมอนุภาคอย่างเหมาะสม

สำหรับค่าความหนาแน่น (Figure 6) มีแนวโน้มลดลงจาก 1,280 kg/m³ ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1,150 kg/m³ ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นการลดลง 10.2 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่ระดับ 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ อยู่ที่ 1,240 และ 1,220 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งยังอยู่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของ มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตชนิด C12 (1,001–1,200 kg/m³) อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ยังคงสะท้อนความสมดุลระหว่างน้ำหนักเบาและความแข็งแรงในระดับที่เหมาะสม จึงกล่าวโดยสรุปว่าการใช้เศษแก้วบดในช่วง 40 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เป็นช่วงที่ให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่นเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการวัสดุก่อสร้างมวลเบาซึ่งสอดคล้องกับงานของ Muhedin and Ibrahim (2023) ที่พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มกำลังอัดโดยไม่กระทบต่อความหนาแน่นมากนัก ขณะที่ Taha and Nounu (2008) รายงานว่าเมื่อใช้เศษแก้วบดเกินระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดผลกระทบต่อความหนาแน่นและคุณสมบัติเชิงกลหากไม่มีการควบคุมการกระจายอนุภาคที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแก้วบดรีไซเคิลในคอนกรีตมวลเบาในทุกอัตราส่วนสามารถให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนด ใน มอก. 2601-2556 ทั้งชนิด C9-C12 และ C14-C16 ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ทรายธรรมชาติลงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลต่อวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตมวลเบา

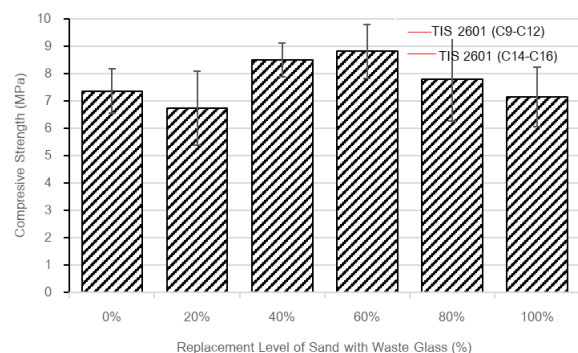


Figure 5 Compressive strength of lightweight concrete with varying levels of sand replacement by waste glass after 7 days of curing.

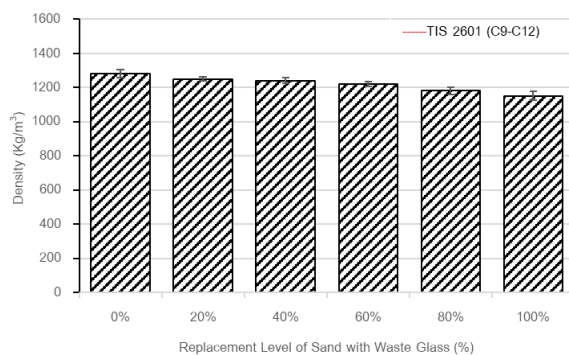


Figure 6 Density of lightweight concrete with varying levels of sand replacement by waste glass after 7 days of curing.

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบดที่ระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือเป็นจุดสมดุลระหว่างสมรรถนะทางวิศวกรรมและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน โดยจุดสมดุลดังกล่าวหมายถึงการเลือกสูตรผสมที่สามารถรักษาค่ากำลังอัดให้อยู่ในระดับสูง (7.91 MPa ที่ 80 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำตาม มอก. 2601-2556 และมีความหนาแน่นเหมาะสมสำหรับคอนกรีตมวลเบา (1,180 g/m³) ขณะเดียวกันสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ จึงช่วยลดผลกระทบจากการหลอม การผลิตขวด และการขนส่งวัสดุใหม่ อีกทั้งยังเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งในระบบจัดการของเสีย ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

ทั้งนี้แม้ว่าการบดเศษแก้วให้มีขนาดละเอียดจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้า แต่เมื่อพิจารณาจากมุมมองของเศรษฐกิจหมุนเวียนและการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Perspective) แล้ว การใช้เศษแก้วบดยังคงมีศักยภาพในการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดปริมาณขยะที่ต้องกำจัด และลดผลกระทบจากการทำเหมืองทรายและการขนส่งได้ (Zhou *et al.*, 2023; Poudel *et al.*, 2025) โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนหรือเชื่อมโยงกับระบบจัดการของเสียในพื้นที่ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น

2.4 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

จากอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเถ้ากลบ 30 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 ผง

อลูมิเนียม 1.0 เปอร์เซ็นต์ และการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบด 80 เปอร์เซ็นต์ มาศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มโดยเปรียบเทียบคุณสมบัติที่อายุ 7 วันและ 28 วัน ซึ่งแสดงไว้ใน Table 3

จากตารางพบว่า ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 3.85 ± 0.22 MPa ที่อายุบ่ม 7 วัน เป็น 5.53 ± 0.33 MPa ที่ 28 วัน คิดเป็น 43.6 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของกำลังอัดที่ชัดเจนในช่วงเวลาบ่ม ซึ่งเป็นผลจากการดำเนินของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการสร้างเจล C-S-H เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสารยึดเหนี่ยวหลักของโครงสร้างคอนกรีตเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต แนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jantasuto *et al.* (2021) และ Akanbi *et al.* (2024) ซึ่งระบุว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก และสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกเนื่องจากได้รับการบ่มที่เหมาะสม

ค่าความหนาแน่นลดลงจาก $1,100 \pm 0.02$ kg/m³ ที่ 7 วัน เหลือ $1,070 \pm 0.07$ kg/m³ ที่ 28 วัน ลดลง 2.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นคอนกรีตมวลเบา แม้ไม่ถึงเกณฑ์ขั้นต่ำของ มอก. สำหรับ C12 แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่เน้นน้ำหนักเบาเป็นหลักผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นได้รับอิทธิพลจากชนิดและสัดส่วนของวัสดุผสมมากกว่าระยะเวลาการบ่ม ซึ่งเป็นลักษณะปกติของคอนกรีตมวลเบาที่เกิดจากการเติมฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการผลิต

ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจาก 24.05 ± 0.60 เปอร์เซ็นต์ ที่ 7 วัน เป็น 24.97 ± 0.70 เปอร์เซ็นต์ ที่ 28 วัน เพิ่มขึ้น 3.8 เปอร์เซ็นต์ แม้ค่าที่วัดได้จะเกินเกณฑ์ของ มอก. สำหรับชนิด C9-C12 (≤ 23 เปอร์เซ็นต์) แต่ยังไม่เกินขีดจำกัดของชนิด C6-C8 (≤ 25 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงยอมรับได้สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่มีความพรุนสูง ค่าที่เพิ่มขึ้นนี้อาจสะท้อนถึงโครงสร้างรูพรุนที่เปิดมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มยาวขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการซึมผ่านของน้ำ โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้ผงอลูมิเนียมซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนระหว่างปฏิกิริยากับปูนขาว และเมื่อรวมกับคุณสมบัติเฉพาะตัวของซีเถ้ากลบซึ่งมีลักษณะพรุนสูง ก็ยิ่งทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มดูดซึมน้ำมากขึ้น แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam *et al.* (2021) และ Ferhat *et al.* (2023) ที่รายงานว่าระยะเวลาการบ่มที่ยาวนานจะส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนมีการเชื่อมต่อนกันมากขึ้น และสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ Pachideh and Gholhaki (2019) ยังระบุว่าแม้วัสดุพอลิโพรพิลีนอย่างซีเถ้า

แอลบอาจช่วยลดการดูดซึมน้ำในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถลดผลกระทบจากรูพรุนที่เกิดจากฟองก๊าซได้อย่างสมบูรณ์

โดยสรุปแล้วปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติคอนกรีตมวลเบาเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น คือ ปฏิกริยาเคมีและโครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการออกแบบส่วนผสม ซึ่งมีผลต่อทั้งกำลังอัดและการดูดซึมน้ำ ในขณะที่ความหนาแน่นได้รับอิทธิพลหลักจากองค์ประกอบวัสดุผสม

และชนิดของคอนกรีตเป็นสำคัญ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งสามตัวแปร พบว่าอัตราส่วนผสมที่เลือกสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นในระดับที่เกินขีดจำกัด และยังควบคุมการดูดซึมน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ จึงถือว่ามีศักยภาพในการนำไปใช้จริงในงานก่อสร้างที่ต้องการวัสดุเบาและยั่งยืน

Table 3 Properties of Lightweight Concrete with 80 Recycled Glass Sand Replacement Compared to TIS 2601–2013

Property	7 days	28 days	TIS 2601
Compressive Strength (MPa)	3.85 ± 0.22	5.53 ± 0.33	≥ 5.0 (C14–C16)
			≥ 2.5 (C9–C12)
Density (kg/m ³)	1,100 ± 0.02	1,070 ± 0.07	1001–1200 (C12)
			≤ 23.0 (C9–C12)
Water Absorption (percent)	24.05 ± 0.60	24.97 ± 0.70	(≤25%) (C6–C8)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ในการศึกษานี้เพื่อพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองโดยประยุกต์ใช้ซีเมนต์แอลบและเศษแก้วรีไซเคิลภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยมุ่งเน้นการหาส่วนผสมที่เหมาะสมและประเมินสมบัติทางวิศวกรรม อันได้แก่ ค่ากำลังอัด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์แอลบซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ (1.57 g/cm³) และการดูดซึมน้ำสูง (4.23 เปอร์เซ็นต์) สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน w/b = 0.6 โดยให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงถึง 14.20 MPa สูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำตาม มอก. 2601–2556 สำหรับคอนกรีตทั้งชนิด C14–C16 (≥ 5 MPa) และชนิด C9–C12 (≥ 2.5 MPa) ในขณะเดียวกัน เศษแก้วบดสามารถใช้แทนทรายได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ โดยค่ากำลังอัดยังคงสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (7.91 MPa) และสามารถลดค่าความหนาแน่นจาก 1,280 เป็น 1,180 kg/m³ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

การเติมผงอลูมิเนียมในสัดส่วน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 5.81 MPa และค่าความหนาแน่นที่ต่ำที่สุด 1,270 kg/m³ ซึ่งยังคงอยู่

ภายในเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตมวลเบา ชนิด C14 (1,201–1,400 Kg/m³)

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการบ่มร่วมกับอัตราส่วนที่คัดเลือกมา พบว่า การบ่ม 28 วันช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดจาก 3.85 MPa (ที่ 7 วัน) เป็น 5.53 MPa ขณะที่ความหนาแน่นลดลงจาก 1,100 kg/m³ เป็น 1,070 kg/m³ ที่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิด C9–C12 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 24.05 เปอร์เซ็นต์ เป็น 24.97 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาชนิด C6–C8 (≤ 25 เปอร์เซ็นต์) แต่เกินเกณฑ์ที่กำหนดของชนิด C9–C12 (≤ 23 เปอร์เซ็นต์) เล็กน้อย

ดังนั้น การศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของซีเมนต์แอลบและเศษแก้วบดในการเป็นวัสดุทดแทนสำหรับคอนกรีตมวลเบาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมและความยั่งยืน ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของแนวทาง BCG Economy ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าควบคู่กับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

เพื่อพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ควรศึกษาคุณสมบัติด้านความทนทาน (Durability) เช่น การซึมผ่านของคลอไรด์

การเปลี่ยนแปลงสมบัติภายใต้สภาวะเปียก-แห้งสลับ (Wet-Dry cycles) รวมถึงลักษณะจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มเติมด้วยเทคนิค SEM หรือ XRD เพื่อให้เข้าใจกลไกภายในวัสดุอย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบเพื่อนำไปทดสอบภาคสนามและศึกษาการเปรียบเทียบวัสดุทดแทนจากแหล่งชีวมวลอื่น รวมถึงต้นทุนการผลิตเพื่อขยายศักยภาพการใช้วัสดุเหลือทิ้งในบริบทต่าง ๆ อย่างยั่งยืน

จากงานวิจัยในครั้งนี้ไม่มีตัวอย่างควบคุมที่ใช้เป็นวัสดุปกติ เนื่องจากผู้วิจัยออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. โดยตรง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ผลการศึกษามีความชัดเจนยิ่งขึ้นจึงควรมีการจัดทำตัวอย่างควบคุมไว้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากห้องปฏิบัติการของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินการทดลองอย่างครบถ้วน และขอขอบคุณคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2565 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่นและบรรลุเป้าหมายตามที่กำหนดไว้

เอกสารอ้างอิง

- โชคชัย ไตรยสุทธิ. (2564). การศึกษาระยะเวลาก่อตัว ความสามารถในการเทได้ และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราในการซ่อมผิวทาง. *วารสารวิชาการอุตสาหกรรมพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 12(2), 91–101. <https://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jote/article/download/5453/3750>
- ณรงค์ศักดิ์ เย็นประเสริฐ และ อาทิตยา ดวงจันทร์. (2564). ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่มีผงอะลูมิเนียมเป็นส่วนผสม. *วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ*, 9(1), 83–91. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmtsb-sci/article/download/248711/171867>
- ทัศนียา กลิ่นขจร, สิริณญา กุลวงศ์, จิตภา ปัทม, สิทธิชัย ใจขาน, สมเจตน์ ทองดำรงธรรม และ ถนัดกิจ ชารีรัตน์. (2565). ผลของวัสดุปอชโซลานแก่กลบต่อสมบัติของอิฐมวลเบา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีศึกษา*, 5(2), 182–190. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JSSE/article/download/257255/176722>

- ธรรพร บุญน้ำเพชร และ นิพนธ์ ดันไพบูลย์กุล. (2559). สมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมยางรถยนต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยศิลปากร (Veridian E-Journal: Science and Technology Silpakorn University)*, 3(4), 62–75. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/VESTSU/article/view/71986>
- บุรณัตร์ จัตรวีระ, เรวัตติ หน่ายมี และ ณัฏฐ์ มากุล. (2554). สมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 34(4), 395–414. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/KMIT/10830825.pdf>
- ประชุม คำพูน และ ทวีช กล้าแท้. (2565). คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้ากลบแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน. *วารสารวิศวกรรม มทร.ธัญบุรี*, 20(1), 81–91. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt/article/download/248557/168684>
- ฝ่ายสื่อสารและภาพลักษณ์องค์กร. (2563). *โมเดลเศรษฐกิจใหม่ BCG*. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). https://www.nstda.or.th/home/knowledge_post/bcg-by-nstda/
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). *มอก. 2601-2556: คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ*. กระทรวงอุตสาหกรรม. [https://www.tisistandard/2601-2556.pdf](https://www.tisi.go.th/data/service/tisistandard/2601-2556.pdf)
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2562). *มอก. 2752 เล่ม 2-2562: วิธีทดสอบปูนซีเมนต์ เล่ม 2 วิธีทดสอบความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก*. กระทรวงอุตสาหกรรม. https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf_files/standards_development/5_TIS2752_2-2562.pdf
- Akanbi, T. Y., Habibu, A. S., Azare, A. A., & Okah, M. C. (2024). Evaluating the relationship between curing time and compressive strength in concrete: A statistical analysis. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 346–352. <https://doi.org/10.4314/fuoyej.v9i2.27>
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>

- ASTM International. (2019a). *ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM International. (2019b). *ASTM C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- ASTM International. (2020). *ASTM C109/C109M-20b: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20B
- ASTM International. (2021a). *ASTM C305-20: Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency*. <https://doi.org/10.1520/C0305-20>
- ASTM International. (2021b). *ASTM C642-21: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- Bangwar, D. K., Saand, A., Keerio, M. A., Soomro, M. A., & Bhatti, N.-u.-K. (2017). Development of an amorphous silica from rice husk waste. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(6), 2184–2188. <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/1534>
- Ferhat, A., Goual, M. S., Damene, Z., & Quéneudec, M. (2023). Experimental study on the effect of lime and aluminium content on porosity, introduced porosity, compressive strength and thermal conductivity of a lightweight cellular concrete based on limestone sand. *Construction and Building Materials*, 392, 131552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131552>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675–1683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>
- Hasanbeigi, A., Srinivasan, P., Chen, H., & Efram, N. (2024). *Adoption of limestone calcined clay cement and concrete in the U.S. market*. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE) & Global Efficiency Intelligence (GEI). <https://www.aceee.org/research-report/i2401>
- Ibrahim, K. (2020). Recycled waste glass [WG] in concrete. *Global Journal of Engineering Sciences*, 6(1). <https://doi.org/10.33552/GJES.2020.06.000627>
- Ichino, H., Kuwahara, N., Beppu, M., Williamson, E. B., & Himi, A. (2024). Effects of the shape, size, and surface roughness of glass coarse aggregate on the mechanical properties of two-stage concrete. *Construction and Building Materials*, 411, 134296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134296>
- Ige, J. A., Alabi, A. A., Adejumbi, A. O., Ayanlola, J. A., Ogunjinmi, M. O., & Odaliji, A. O. (2024). The effect of fineness modulus of fine aggregate on concrete compressive strength. *LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies*, 12(1), 27–33. https://laujoces.org/article_download/vol_12/issue_1/Paper_3.pdf
- Islam, M. M., Rashid, M. H., & Muntasir, M. A. (2021). Influence of aluminium and autoclaving temperature on the properties of autoclaved aerated concrete. *Journal of Engineering Science*, 12(3), 11–17. <https://doi.org/10.3329/jes.v12i3.57475>
- Jantasuto, O., Wiwattanachang, N., & Youngsukasem, N. (2021). Relationship between porosity & compressive strength of concrete with variable W/C ratio. *UTK Research Journal*, 15(1), 74–82. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk/article/view/244227>
- Manjunath, N. K., Kumar, B. C. L., Annapurna, B. P., & Jogi, P. K. (2017). Effect of effective porosity and saturated water absorption on rice husk ash-filtered sand self-compacting concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IR-JET)*, 4(3), 1218–1225. <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I3290.pdf>
- Muhedin, D. A., & Ibrahim, R. K. (2023). Effect of waste glass powder as partial replacement of cement & sand in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02512. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512>

- Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (2011). Field investigation of concrete incorporating milled waste glass. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 37(4), 307–319. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2011.307>
- Oluwasola, E. A., Afolayan, A., Ipindola, O. O., Popoola, M. O., & Oginni, A. O. (2020). Effect of aggregate shapes on the properties of concrete. *LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies*, 5, Article 0110. [https://doi.org/10.36108/laujoces/0202/50\(0110\)](https://doi.org/10.36108/laujoces/0202/50(0110))
- Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100856>
- Park, S. H., Ryu, H. S., & Park, W. J. (2024). Influence of unit water content control on concrete performance in the ready-mixed concrete production process. *Materials*, 17(4), 834. <https://doi.org/10.3390/ma17040834>
- Poudel, S., Bhetuwal, U., Kharel, P., Khatiwada, S., KC, D., Dhital, S., Lamichhane, B., Yadav, S. K., & Suman, S. (2025). Waste glass as partial cement replacement in sustainable concrete: Mechanical and fresh properties review. *Buildings*, 15(6), 857. <https://doi.org/10.3390/buildings15060857>
- Saad, S. A., Nuruddin, M. F., Shafiq, N., & Ali, M. (2015). Pozzolanic reaction mechanism of rice husk ash in concrete – A review. *Applied Mechanics and Materials*, 773–774, 1143–1147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1143>
- Taha, B., & Nounu, G. (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>
- Van, L. T., Kim, D. V., Xuan, N. H., Dinh, T. V., Bulgakov, B., & Bazhenova, S. (2019). Effect of aluminium powder on light-weight aerated concrete properties. *E3S Web of Conferences*, 97, 02005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702005>
- Zhou, C., Li, M., Nguyen, Q. D., Lin, X., Castel, A., Pang, Y., Deng, Z., Shi, T., & Mai, C. (2023). Application of waste glass powder for sustainable concrete: Design, performance, perspective. *Materials*, 18(7), 734. <https://doi.org/10.3390/ma18070734>