วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 32, ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2565
The Journal of KMUTNB., Vol. 32, No. 3, Jul.–Sep. 2022

บทความวิจัย

อิทธิพลของการใช้กากปูนขาวจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก

ดิศสกุล อึ้งตระกูล
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 4177 2309 อีเมล: shockice69@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.011
รับเมื่อ 8 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 17 กันยายน 2563 ตอบรับเมื่อ 30 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 16 พฤศจิกายน 2564
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กากปูนขาวทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตบล็อก โดยการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่กากปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 20–80 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับไม่มีการแทนที่ด้วยกากปูนขาว ศึกษาจำนวนสูตรผสม 5 สูตร ทำการขึ้นรูปคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ จากการทดลองพบว่า การแทนที่กากปูนขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (B-CM) ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยสูงที่สุด 1,973 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าการไม่แทนที่ด้วยกากปูนขาว รองลงมาคือ สูตร C-CM ให้ค่าความหนาแน่น 1,928 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จากการทดสอบความต้านแรงอัดแบบลดพื้นที่หน้าตัดของสูตรผสมที่มีการแทนที่ด้วยกากปูนขาวพบว่า ความต้านแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 6.60 เมกะปาสคาล (B-CM) และ 4.02 (C-CM) จากการแทนที่กากปูนขาวร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก การแทนที่ด้วยกากปูนขาวบางส่วนสามารถช่วยปรับปรุงค่าความต้านแรงอัดให้มีค่าเพิ่มขึ้น ทำการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกรูปทรงขนาดมาตรฐานจากสูตร C-CM พบว่า ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1,314.18 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ให้ค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 9.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำ 1.03 ค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ย 2.27 เมกะปาสคาล ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2533

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อก กากปูนขาว ความต้านแรงอัด ความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ

การอ้างอิงบทความ: ดิศสกุล อึ้งตระกูล, "อิทธิพลของการใช้กากปูนขาวจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 748–757, ก.ค.–ก.ย. 2565.

Research Article

The Influence of Lime Mud Waste from the Pulp and Paper Industry as a Replacement of Portland Cement Concrete on Properties of Concrete Masonry Units

Ditsakul Uengtrakool*
Faculty of Architecture and Environmental Design, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 4177 2309, E–mail: shockice69@gmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.011
Received 8 July 2020; Revised 17 September 2020; Accepted 30 September 2020; Published online: 16 November 2021
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The aim of this research is to study the possibility of lime mud as Portland cement replacement materials for concrete masonry unit production. This study determined the optimal ratio of 20-80% by weight of lime mud waste replacement to compare with the replacement without lime mud with 5 formulas for making cubic blocks. The results showed that 20% by weight of lime mud waste replacement following formula B-CM yielded the maximum average density of 1,973 kg/m^3, which was higher than the method without lime mud waste replacement. The next experiment results of density was 1,928 kg/m^3 from C-CM formula. However, the compressive test by reducing cross sectional area with 20% and 40% by weight of lime mud waste replacement showed the maximum average compressive strength of 6.60 MPa (B-CM) and 4.02 MPa (C-CM), respectively. It can be concluded that lime mud waste partial replacement can improve the compressive strength of concrete masonry units. The results found that the average density of concrete masonry units with standard size following C-CM formula was 1,314.18 kg/m^3, and the maximum average water absorption, saturation coefficient and average compressive strength were 9.4%, 10.3 and 2.27 MPa, respectively. These outcomes were found to meet the industrial standards: TIS 58-2533 for hollow non-load-bearing concrete masonry units.

Keywords: Concrete Masonry, Lime Mud Waste, Compressive Strength, Density, Water Absorption

Please cite this article as: D. Uengtrakool, "The influence of lime mud waste from the pulp and paper industry as a replacement of portland cement concrete on properties of concrete masonry units," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 748–757, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

เนื่องจากความต้องการใช้อิฐในการก่อสร้างในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นสำหรับการก่อสร้างอาคาร และเพื่อความรวดเร็วในการก่อสร้าง ทำให้ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาอิฐก่อสร้างให้อยู่ในรูปแบบของคอนกรีตบล็อก (Concrete Masonry Unit) ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและประหยัดค่าใช้จ่าย [1], [2] ทำให้ในปัจจุบันคอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในงานก่อสร้าง เช่น ผนัง กำแพง หรือใช้เป็นวัสดุตกแต่งในงานสถาปัตยกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติทางด้านการถ่ายเทความร้อน จากการที่มีโพรงอากาศทำให้เป็นฉนวนในการกันความร้อนที่ดี มีความคงทนแข็งแรง และในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมามีอัตราการขยายตัวของแหล่งที่อยู่อาศัย รวมไปถึงการก่อสร้างทางสถาปัตยกรรมที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการใช้คอนกรีตบล็อกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ถึงแม้ปัจจุบันจะมีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาหาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแบบยั่งยืนสำหรับเป็นวัสดุประกอบอาคาร แต่อย่างไรก็ตาม คอนกรีตบล็อกก็ยังคงมีการผลิตในรูปแบบแนวทางของการใช้วัสดุที่ไม่ยั่งยืน [3] โดยเฉพาะในประเทศที่กำลังพัฒนา สำหรับใช้เป็นส่วนประกอบของอาคาร เนื่องจากมีข้อดีทางด้านราคาที่ไม่สูงมากนัก มีความทนทาน มีความยืดหยุ่นสำหรับการใช้งานทางสถาปัตยกรรม และสามารถหาซื้อได้ทั่วไปในย่านแหล่งพักอาศัย ในด้านการประหยัดพลังงานการก่อสร้างผนังก่ออิฐบล็อก สามารถเพิ่มโครงสร้างฉนวนดูดซับเสียงและฉนวนเพื่อป้องกันอัคคีภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

การผลิตคอนกรีตบล็อกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ประกอบด้วยสารออกไซด์ (Major Oxides) เป็นหลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันได้กว่าร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor Oxide) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์อัลคาไล (Na_2O และ K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) [5] ซึ่งในการผลิตนั้นจะมีการใช้ปริมาณเชื้อเพลิง และพลังงานที่สูงมากจากการเผาสารออกไซด์ และยังมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในปริมาณมาก [6] และวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นได้มาจาการการระเบิดภูเขาหินปูน ทำให้ส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามมา จึงได้มีการพัฒนาคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยนำวัสดุเหลือใช้มาเป็นวัสดุในการขึ้นรูป เช่น วัสดุทางการเกษตร เถ้าลอยต่างๆ และจีโอพอลิเมอร์ [1], [7] จากการทดลองความแตกต่างของขนาดให้เหมาะสมสำหรับโครงสร้างผนังในการรับน้ำหนัก และปรับปรุงกลไกการก่อประสานการจัดรูปแบบผนังในแนวตั้งและแนวนอน อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีปัญหาในด้านโครงสร้างของการรับแรงกด [8]–[10] ได้มีการศึกษาวิจัยการนำวัสดุปอซโซลานมาผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังคงมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมหลัก [11] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตด้วยการประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานจากตะกอนประปา และเถ้าชานอ้อยในการผลิตคอนกรีตมวลเบา ซึ่งมีค่าความต้านแรงอัดประมาณ 48 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร [12]

กากปูนขาวเป็นของเหลือใช้จากกระบวนการนำสารเคมีกลับคืนในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ที่มีปริมาณมากถึง 590 ตัน/วัน ซึ่งต้องนำกลับไปเผาในเตาเผากากปูน (Lime Kiln) เพื่อสามารถใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป แต่ปริมาณกากปูนขาวที่มาก ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 8–10 ปี [13] และการกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบทำให้เพิ่มต้นทุนในการกำจัดและส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งฝังกลบและกากปูนขาวดังรูปที่ 1 ได้มีการศึกษาวิจัยการนำกากปูนขาวมาเป็นส่วนผสมทดแทนทรายในวัสดุปูนก่อและปูนฉาบพบว่า มีค่าการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น อยู่ในช่วงร้อยละ 50–86 แต่ความต้านแรงอัดกลับมีค่าลดลง อยู่ในช่วง 3.2–23.15 เมกะปาสคาล [14] พบว่า ความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ที่น้อยที่สุดในการทดสอบมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน แต่ค่าความต้านแรงอัดที่อายุ

(ก) (ข)

รูปที่ 1 แหล่งฝังกลบ (ก) และ กากปูนขาว (ข)

28 วัน ของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณกากปูนขาวที่เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยดังที่กล่าวมา กากปูนขาวจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษจึงเป็นวัตถุดิบผสมที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเพื่อแก้ปัญหาคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกจากการใช้วัสดุทดแทน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการนำกากปูนขาวในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษจากแหล่งฝังกลบมาผลิตคอนกรีตบล็อก เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อกให้มีสมบัติตามมาตรฐานสำหรับงานก่อสร้าง โดยหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างกากปูนขาวปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และหินฝุ่น สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังช่วยลดปัญหาการลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

กากปูนขาว (Lime Mud) เป็นวัตถุดิบเหลือใช้ในกระบวนการนำสารเคมีกลับคืน (Chemical Recovery) จากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษของโรงงาน ซึ่งถูกจัดเก็บไว้บริเวณแหล่งฝังกลบของบริษัท ฟินิคซ พัลพ แอนด์ เพเพอร์ จำกัด (มหาชน) ตำบลกุดน้ำใส อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น จากนั้นนำไปตากให้แห้งโดยไม่ต้องผ่านการอบ และกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมาในกากปูนขาวออกด้วยการร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 100 และเก็บในภาชนะปลอดความชื้น ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะของกากปูนขาวในการวิจัยที่ 1.25

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement) ประเภท 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา มีความถ่วงจำเพาะที่ 3.15 สำหรับงานคอนกรีตทั่วไปตราช้าง มาตรฐานตามเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ มอก.15 เล่ม 1

ทราย (Sand) เป็นทรายแม่น้ำ หรือทรายหยาบมวลผสมทั่วไป ส่วนใหญ่ค้างอยู่บนตะแกรงร่อนขนาด 4.75 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ละเอียดผสมอยู่ได้บ้างตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลผสมคอนกรีต (มอก.566-2528)

หินฝุ่น (Stone Dust) เป็นหินฝุ่น ขนาด 3/4 นิ้ว หรือหินฝุ่นเบอร์ 1 นำมาล้างทำความสะอาดเพื่อนำสิ่งเจือปนต่างๆ พวกอินทรียวัตถุที่อาจติดมากับหินฝุ่น ก่อนนำวัตถุดิบต่างๆ มาผสมตามอัตราส่วนที่กำหนด

2.2 การศึกษาผลของกากปูนขาวต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก

ทำการเตรียมส่วนผสมที่ไม่มีการใช้กากปูนขาว โดยกำหนดสูตรผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทรายหยาบ และหินฝุ่น อัตราส่วน 1 : 3 : 5 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำสะอาดร้อยละ 10 ของน้ำหนักส่วนผสมรวมทั้งหมด เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่เหมาะกับการเทคอนกรีตหยาบหรืองานรับกำลังได้ต่ำ จึงนำมาเป็นอัตราส่วนผสมตั้งต้น จากนั้นทำการศึกษาอัตราส่วนของกากปูนขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 โดยน้ำหนัก ทุกอัตราส่วนผสมน้ำสะอาดร้อยละ 10 โดยแต่ละอัตราส่วนทำการขึ้นรูปจำนวน 6 ก้อน ดังตารางที่ 1

2.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ทำการผสมสูตรผสมแต่ละสูตรให้เข้ากันและขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อก้อนคอนกรีตด้วยแบบหล่อเหล็ก (Molds) รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 × 5 × 5 เซนติเมตร อัตราส่วนละ 6 ก้อน ดังรูปที่ 2 เมื่อครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบหล่อก้อน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมในการทดลอง

สูตรผสม	รายละเอียด			
	กากปูนขาว (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	ทรายหยาบ (ร้อยละ)	หินฝุ่น (ร้อยละ)
A-CM-1-6	0	1	3	5
B-CM-1-6	20	0.8	3	5
C-CM-1-6	40	0.6	3	5
D-CM-1-6	60	0.4	3	5
E-CM-1-6	80	0.2	3	5
สัญลักษณ์: A คือ สูตรผสม CM คือ คอนกรีตบล็อก (Concrete Masonry Units) 1-6 คือ จำนวนก้อนทดสอบ				

รูปที่ 2 คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์

คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ และบ่มชื้นโดยวิธีแช่น้ำเป็นระยะเวลา 3 วัน จากนั้นตากให้ก้อนคอนกรีตแห้งเป็นระยะเวลา 28 วัน และทำการทดสอบความต้านแรงอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.58-2533) คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ประเภทไม่ควบคุมความชื้น

2.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตบล็อก

ทำการคัดเลือกโดยพิจารณาส่วนผสมที่ให้ผลการทดสอบความต้านแรงอัดผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.58-2533) และมีส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยกากปูนขาวมากที่สุด ทำการเตรียมส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยการใช้เครื่องโม่ผสมปูน ใช้แม่พิมพ์คอนกรีตบล็อกในการขึ้นรูป ตามขนาดมาตรฐานการใช้งานจริง

รูปที่ 3 คอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐาน

ขนาด 70 × 190 × 390 มิลลิเมตร มิติพิกัด 4/5 × 2 × 4 จากนั้นตากให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มด้วยวิธีการแช่น้ำเป็นเวลา 3 วัน ทำการทดสอบความต้านแรงอัดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐาน มอก.109 ทำการทดสอบอัตราดูดกลืนน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำของก้อนคอนกรีตบล็อก คอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐาน ดังรูปที่ 3

3. ผลการทดลอง

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาว

จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาว ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ดังตารางที่ 2 พบว่า กากปูนขาวที่นำมาวิจัยมีปริมาณ CaO เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 96.70 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ SiO_2, SO_3, $Fe2O_3$ และ Fe_2O_3, ZnO และ SrO มีปริมาณร้อยละ 1.55, 0.66, 0.47, 0.42 และ 0.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกับการทดลองของดิสพล [14] ซึ่งผลวิเคราะห์มีปริมาณ CaO เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 60–67 โดยน้ำหนัก ซึ่ง CaO ถือเป็นสารประกอบออกไซด์หลักที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5] จากตารางผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า มี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย [3] จึงมีความเป็นไปได้ในการนำกากปูนขาวเหลือใช้จากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษของโรงงานมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

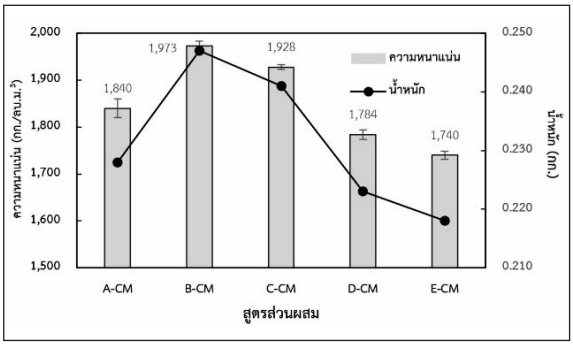
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาว

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]	กากปูนขาวในงานวิจัย
CaO	60–67	96.70
SiO_2	17–25	1.55
Al_2O_3	3–8	-
Fe_2O_3	0.5–6.0	0.47
MgO	0.1–4.0	-
Na_2O	0.1–1.8	-
K_2O	0.1–1.8	-
SO_3	0.5–3.0	0.66
ZnO	-	0.42
SrO	-	0.20
อื่นๆ	0.5–3.0	-

3.2 ผลของปริมาณกากปูนขาวต่อน้ำหนักและความหนาแน่นของคอนกรีตรูปลูกบาศก์

น้ำหนักของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์จากแต่ละสูตรที่ได้หลังจากการแกะออกจากแบบหล่อเหล็ก และบ่มชื้นคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน แต่ละสูตรที่ได้มีน้ำหนักเฉลี่ย อยู่ในช่วง 0.247–0.218 กิโลกรัม และสูตร B-CM เมื่อมีการแทนที่ด้วยกากปูนขาวร้อยละ 20 มีน้ำหนักสูงสุดเฉลี่ย 0.247 กิโลกรัม แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนกากปูนขาวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้น้ำหนักของก้อนคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ลดลง ดังรูปที่ 4

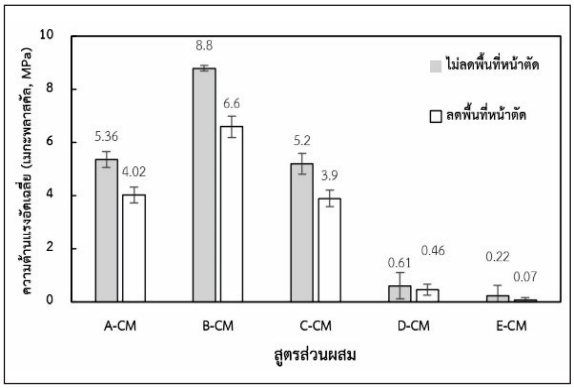
จากการศึกษาผลของปริมาณปูนขาวร้อยละ 20–80 โดยน้ำหนัก เป็นส่วนผสมในการแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อค่าความหนาแน่น ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ซึ่งเป็นการทดสอบหาความหนาแน่นของคอนกรีต เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมกากปูนขาว จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของแต่ละสูตรอยู่ในช่วง 1,740–1,973 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่อมีการแทนที่ด้วยกากปูนขาวร้อยละ 20 (สูตร B-CM) ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยสูงที่สุด 1,973 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากกากปูนเข้าไปเชื่อมประสานช่องว่างในส่วนผสมของวัตถุดิบทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดีขึ้น ทำให้ปริมาณโพรงอากาศลดลง ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเพิ่มสูงขึ้น [15] ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งค่าความหนาแน่นแปรผันตรงกับค่าความแข็งแรงของคอนกรีต [3] จากการทดลองเติมกากปูนขาวสูตรผสม B-CM และ C-CM ที่อัตราการเติมกากปูนขาวร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าการทดลองที่ไม่เติมกากปูนขาว (สูตร A-CM) โดยสูตร B-CM และ C-CM ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1,973 และ 1,928 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ในขณะที่สูตรผสม A-CM ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเพียง 1,840 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกในแต่ละสูตรผสมพบว่า น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกจะแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่น เมื่อน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น น้ำหนักคอนกรีตบล็อกน้อยที่สุดที่สูตรการผสมการแทนที่ด้วยกากปูนขาวร้อยละ 80 (E-CM) คือ 0.218 กิโลกรัม ให้ค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด คือ 1,740 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



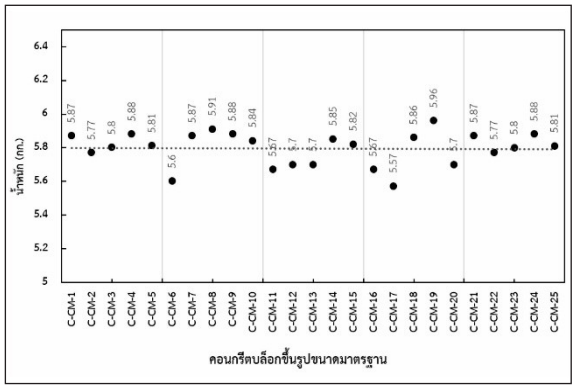
รูปที่ 4 น้ำหนักและความหนาแน่นของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์

3.3 ผลของปริมาณปูนขาวต่อความต้านแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์

การทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกแต่ละสูตรผสมคำนวณจากการลดพื้นที่หน้าตัดพบว่า สูตร B-CM ให้ความต้านแรงอัดเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 6.60 เมกะปาสคาล ในสูตรผสมที่มีการเติมกากปูนขาวร้อยละ 20 การเติมกากปูนขาวทำให้ความต้านแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ด้วยกากปูนขาวจะทำให้ปริมาณโพรงอากาศลดลง ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นทำให้ความต้านแรงอัดสูงขึ้นตามไปด้วย [15]



รูปที่ 5 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์



รูปที่ 6 น้ำหนักคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พิสูจน์ให้เห็นว่าการเติมกากปูนขาวสามารถทดแทนปูนซีเมนต์ได้บางส่วนและสามารถปรับปรุงแรงอัดของคอนกรีตผสมได้ [16] การเติมกากปูนขาวความต้านแรงอัดสูตรผสม A-CM และสูตร C-CM ให้ความต้านแรงอัด 4.02 และ 3.90 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.58-2533) พบว่า ความต้านแรงอัดสูงกว่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ประเภทไม่ควบคุมความชื้น ซึ่งควบคุมความต้านแรงอัดที่ 2.5 เมกะปาสคาล และสูตร D-CM และ E-CM ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มีความต้านแรงอัดเพียง 0.46 และ 0.07 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

การทดสอบความต้านแรงอัดแบบไม่ลดพื้นที่หน้าตัด พบว่า ความต้านแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 8.80 เมกะปาสคาล (B-CM) จากการแทนที่ของกากปูนขาวร้อยละ 20 และความต้านแรงอัดเฉลี่ยน้อยที่สุด 0.22 เมกะปาสคาล จากการแทนที่ด้วยปูนขาวร้อยละ 80 การแทนที่ของกากปูนขาวส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่ด้วยกากปูนขาว แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของกากปูนขาวมากกว่าร้อยละ 20 ส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดลดลง ดังรูปที่ 5 จากการทดลองทำการคัดเลือกสูตรส่วนผสมโดยพิจารณาจากผลของค่าความหนาแน่น และความต้านแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และมีส่วนผสมในการแทนที่กากปูนขาวสูงที่สุด จึงทำการคัดเลือกสูตร C-CM มาทำการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐาน จำนวน 25 ก้อน

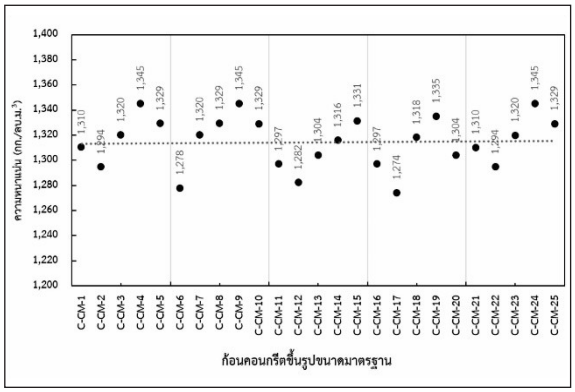
3.4 น้ำหนักและความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

น้ำหนักของคอนกรีตขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน จากสูตร C-CM ที่มีการแทนที่ด้วยกากปูนขาวร้อยละ 40 จากการขึ้นรูปจำนวน 25 ก้อน หลังการบ่มเป็นเวลา 28 วัน พบว่าให้ค่าน้ำหนักเฉลี่ย 5.79 กิโลกรัม คิดเป็นปริมาตรเฉลี่ย 0.00441 ลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 6

การทดสอบความหนาแน่นของของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐานจำนวน 25 ก้อน หลังการบ่มเป็นเวลา 28 วัน มีความหนาแน่นเฉลี่ย 1,314.18 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ผลของการขึ้นรูปขนาดมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมีความหนาแน่นลดลงจากการขึ้นรูปในลักษณะทรงลูกบาศก์ เนื่องจากการขึ้นรูปทรงที่ใหญ่ขึ้นทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้นมากกว่าการขึ้นรูปทรงลูกบาศก์ขนาดเล็กที่ส่วนผสมมีการอัดแน่น ความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐาน ดังรูปที่ 7 โดยทั่วไปความหนาแน่นและปริมาณช่องว่างของคอนกรีตบล็อกจะมีลักษณะแปรผกผันซึ่งกันและกันพบว่า ค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นส่งผลต่อปริมาณโพรงที่ลดลงและเชื่อมโยงไปสู่ค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก

3.5 ค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

โดยทั่วไปค่าการดูดกลืนน้ำแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่น ซึ่งค่าความหนาแน่นที่สูงส่งผลต่อค่าการดูดกลืนน้ำ



รูปที่ 7 ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

ที่ลดลง การขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกในส่วนผสม C-CM ที่มีการแทนที่ด้วยกากปูนขาวร้อยละ 40 ทำการทดสอบค่าการดูดกลืนน้ำจำนวน 5 ก้อน ให้ค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ย ร้อยละ 9.2 เมื่อทดสอบการดูดกลืนน้ำในระยะเวลา 5 ชั่วโมง และร้อยละ 9.4 เมื่อทดสอบการดูดกลืนน้ำในระยะเวลา 24 ชั่วโมง การเติมกากปูนขาวทำให้ปริมาณโพรงอากาศลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นจะสูงขึ้น และส่งผลต่อค่าการดูดกลืนน้ำที่ลดลงเช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 3 มีการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนน้ำที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง จากการทดสอบค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐาน จำนวน 5 ก้อน พบว่าให้ค่าการดูดกลืนน้ำที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 ค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

ก้อนคอนกรีต	ค่าการดูดกลืนน้ำ (ร้อยละ)	
	5 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
C-CM-21	9.0	9.3
C-CM-22	9.5	9.7
C-CM-23	9.6	9.8
C-CM-24	8.4	8.6
C-CM-25	9.5	9.8

3.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

ค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำแสดงถึงความสามารถของอิฐในการต้านการเยือกแข็งและการละลายตัว คำนวณได้จากการคิดจากอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่ถูกดูดกลืนโดยอิฐระหว่างที่แช่ในน้ำในระยะเวลา 5 ชั่วโมง (WS5-WD) เปรียบเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดกลืนโดยอิฐระหว่างที่แช่ในน้ำในระยะเวลา 24 ชั่วโมง (WS24-WD) ตามมาตรฐาน มอก. 153-2540 จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐานหลังการบ่ม 28 วัน จำนวน 5 ก้อน จากการทดลองการแทนที่กากปูนขาวร้อยละ 40 ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำเฉลี่ยที่ 1.03 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

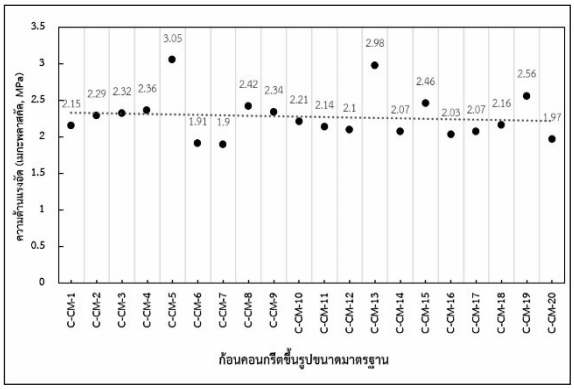
ก้อนคอนกรีต	สัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำ (WS5-WD) / (WS24-WD)	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำ
C-CM-21	1.03	1.03
C-CM-22	1.02	
C-CM-23	1.03	
C-CM-24	1.03	
C-CM-25	1.03	

3.7 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

การทดสอบค่าความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐานสูตร C-CM ที่มีการแทนที่ด้วยกากปูนขาวร้อยละ 40 จำนวน 20 ก้อน หลังการบ่ม 28 วัน พบว่าแต่ละก้อนให้ค่าความต้านแรงอัดใกล้เคียงกัน แสดงถึงความเสถียรของสูตรผสม คิดเป็นค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ย 2.27 เมกะปาสคาล ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก. 58-2533 ผลของความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน ดังรูปที่ 8

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดลองการหาส่วนผสมกากปูนขาวเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ในช่วงอัตราส่วนร้อยละ 20–80 โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี



รูปที่ 8 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกขึ้นรูปขนาดมาตรฐาน

ของกากปูนขาวพบว่า มี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก สูงถึงร้อยละ 96.70 ซึ่ง CaO เป็นวัตถุดิบหลักของการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากการศึกษาหาส่วนประกอบที่เหมาะสมจากสูตรการทดลองทั้งหมด 5 สูตร ในการขึ้นรูปคอนครีตบล็อกรูปทรงลูกบาศก์พบว่า น้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 0.247–0.218 กิโลกรัม ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น พบว่า เมื่อค่าน้ำหนักสูงขึ้นส่งผลต่อค่าความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน สูตร B-CM ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 1,973 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าการไม่แทนที่ด้วยกากปูนขาว รองลงมาคือ สูตร C-CM ให้ค่าความหนาแน่น 1,928 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ค่าความหนาแน่นแปลผันตรงกับค่าความต้านแรงอัด เมื่อค่าความหนาแน่นสูงขึ้นส่งผลต่อค่าความต้านแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

จากการทดสอบความต้านแรงอัดแบบลดพื้นที่หน้าตัดของสูตรผสมที่มีการแทนที่ด้วยกากปูนขาว พบว่า ความต้านแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 6.60 เมกะปาสคาล (B-CM) และ 4.02 (C-CM) การแทนที่ด้วยกากปูนขาวบางส่วนสามารถช่วยปรับปรุงค่าความต้านแรงอัดให้มีค่าเพิ่มขึ้น จากการเติมปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ให้ค่าผลการทดสอบที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2533 จึงทำการคัดเลือกสูตร C-CM โดยการพิจารณาจากการผ่านเกณฑ์มาตรฐานและปริมาณการแทนที่ของกากปูนขาวสูงที่สุด

จากการคัดเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมมาทำการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐาน หลังการบ่ม 28 วัน พบว่าให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1,314.18 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ให้ค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 9.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการอิ่มน้ำ 1.03 ค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ย 2.27 เมกะปาสคาล ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก. 58-2533 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการนำกากปูนขาวมาใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน สามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตบล็อก และเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้ง สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกที่ลดมลพิษที่เกิดจากของเสียเหลือทิ้งโดยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกในงานด้านการก่อสร้างและเป็นวัสดุประกอบอาคาร เพื่อสร้างสุนทรียภาพทางการรับรู้ของสัจจะวัสดุในงานด้านสถาปัตยกรรม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยงบประมาณสนับสนุนจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ รวมทั้งขอขอบคุณบริษัท ฟินิคซ พัลพ แอนด์ เพเพอร์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนวัสดุกากปูนขาวสำหรับการทำวิจัย และคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] M. B. Al-Fakih, F. Nuruddin, and E. Nikbakht, “Development of interlocking masonry bricks and its’ structural behaviour: A review paper,” *Earth and Environmental Science*, vol. 140, no. 1, pp. 1–9, 2018.

[2] M. Ali, R. J. Gultom, and N. Chouw, “Capacity of innovative interlocking blocks under monotonic loading,” *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 812–821, 2012.

[3] M. Madrid, A. Orbe, H. Carre, and Y. Garcia, "Thermal performance of sawdust and lime-mud concrete masonry units," *Construction and Building Materials*, vol. 169, pp. 113–123, 2018.

[4] E. A. W. Hendry, "Masonry walls: Materials and construction," *Construction and Building Materials*, vol. 15, no. 8, pp. 323–330, 2001.

[5] A. Thiwongkum, "Basic properties of concrete containing strength enhancing mineral admixture" M.S. thesis, Department of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2015 (in Thai).

[6] N. P. Rajamane, M. C. Nataraja, and N. Lakshamanan, "An introduction to geopolymer concrete," *Journal of Indian Concrete*, vol. 85, no. 11, pp. 25–28, 2011.

[7] M. E. Nazar and S. N. Sinha, "Fatigue behaviour of interlocking grouted stabilised mud-fly ash brick masonry," *International Journal of Fatigue*, vol. 29, no. 5, pp. 953–961, 2007.

[8] S. I. Fundi, I. W. Kaluli, and J. Kinuthia, "Performance of interlocking laterite soil block walls under static loading," *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp. 75–82, 2018.

[9] W. A. M. Thanoon, A.H. Alwathaf, J. Noorzaei, M. S. Jaafar, and M. R. Abdulkadir, "Finite element analysis of interlocking mortarless hollow block masonry prism," *Computers and Structures*, vol. 86. no. 6, pp. 520–528, 2008.

[10] M. Martínez and S. Atamturktur, "Experimental and numerical evaluation of reinforced dry-stacked concrete masonry walls," *Journal of Building Engineering*, vol. 22, pp. 181–191, 2019.

[11] W. Homsriprasert, "Durability of fly ash-based geopolymer mortar with electric ove curing under sodium sulfate and magnesium sulfate attack," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Thammasat University, 2013 (in Thai).

[12] Y. Sommanawat, "Utilizing sludge from water treatment plant and bagasse ash as combined pozzolanic material in cellular lightweight concrete production," M.S. thesis, Department of Environmental Technology, Mahasarakham University, 2018 (in Thai).

[13] Phoenix Pulp and Paper Public Company Limited. (June, 2019). *Environment impact assessment*. [Online]. Available: http://eia.onep.go.th /projectdetail.php?id=9571

[14] D. Chaowarat, "Utilization of lime mud from pulp and paper industry as masonry and plastering mortar," M.E. Thesis, Environmental Engineering, Graduate School, Khon Kaen University, 2004 (in Thai).

[15] C. Ngohpok, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Sound absorption of pervious concrete containing various sizes of coarse aggregate," *KKU Research Journal*, vol. 19, no. 2, 65–77, 2019.

[16] M. Maggi, A. Orbe, E. Roji, and J. Cuadrado, "The effects of by-products incorporated in low-strength concrete for concrete masonry units," *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 117–128, 2017.