



ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูงต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก

นภดล ศรีภักดี¹ ชูเกียรติ ชูสกุล¹ สุพร ฤทธิภักดี¹ ประชุม คำพุ่ม² เซาฟิร ดีอราแม³
ศศิ ดวนใหญ่⁴ และ ทวิช กล้าแท้^{1*}

¹ สาขาวิศวกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสยาม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 กรกฎาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 22 ธันวาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มกราคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 17 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูงต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก ตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 เรื่องผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก โดยกำหนดอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (ปูนซีเมนต์+เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด : หินฝุ่น) เท่ากับ 1 : 6 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ทดสอบการดูดซึมน้ำ และค่าความหนาแน่น ที่อายุการบ่ม 28 วัน นอกจากนี้ ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตบล็อก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 5.02 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 73 ของคอนกรีตบล็อกที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ที่อายุ 28 วัน ผ่านมาตรฐาน มอก. 58-2560 เรื่องผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก ในขณะที่คอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงมีความหนาแน่นเฉลี่ยลดลง ในขณะที่มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนวัสดุโดยรวมได้ประมาณร้อยละ 28 ถึง 39 และสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตได้มากถึงร้อยละ 41 ถึง 62 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: กำลังอัด; คอนกรีตบล็อกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม; เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด; สังคมคาร์บอนต่ำ; เศรษฐกิจหมุนเวียน

Effect of High Volume Ground Palm Oil Fuel Ash on Properties of Concrete Blocks

Napadon Sornpakdee¹, Chookiat Choosakul¹, Suporn Rittipuakdee¹, Prachoom Khamput², Saofee Dueramae³, Sasi duanyai⁴ and Tawich Klathae^{1*}

¹ Department of Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

⁴ Department of Civil Environment and Sustainable Engineering, Faculty of Engineering, Siam University

* Corresponding author, E-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

Received: 3 July 2025; Revised: 22 December 2025; Accepted: 9 January 2026

Online Published: 17 April 2026

Abstract: This research aims to study the effects of high-volume ground palm oil fuel ash (GPOFA) on the properties of concrete blocks, following the TISI 58-2560 standard for hollow non-load-bearing concrete masonry blocks. The binder-to-fine aggregate ratio (cement + GPOFA : stone dust) was set at 1 : 6 by weight, with four different mixtures containing 0, 50, 60, and 70 wt% of binder. Compressive strength tests were at curing ages of 7, 28, and 56 days, while water absorption and dry density were tests at 28 days. Additionally, the study analyzed production costs and the environmental assessment of the concrete blocks. The results indicated that replacing 70% of the cement with ground GPOFA wt% of binder, produced compressive strength up to 5.02 MPa or approximately 73% of the concrete blocks with cement as the binder material at 28 days, met the minimum specification of the standard for hollow non-load-bearing concrete masonry blocks (TISI 58-2560). However, concrete blocks with high volume of GPOFA decrease average density and an increase water absorption as the rate of cement replaced by GPOFA increased. Furthermore, using a high volume of GPOFA in concrete blocks reduced overall material costs by approximately 28 - 39% and decreased carbon dioxide emissions during production by up to 42 - 63% compared to concrete blocks made with cement as the binder.

Keywords: Circular Economy; Compressive strength; Eco-Friendly concrete blocks; Ground palm oil fuel ash; Low carbon society



1. บทนำ

ธุรกิจวัสดุก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของภาคอสังหาริมทรัพย์ และมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นตามความต้องการทั้งในและต่างประเทศ ส่งผลให้วัสดุก่อสร้างพื้นฐาน มีปริมาณการใช้เพิ่มมากขึ้น จากรายงานของศูนย์วิจัยกรุงศรี พบว่าประเทศไทยมีปริมาณการผลิตและการจำหน่ายคอนกรีตผสมเสร็จประมาณ 18.2 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 6.42 ล้านตันต่อปี ซึ่งทุก ๆ 1 ตันของการผลิตปูนซีเมนต์ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศราว ๆ 1 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ถึง 7 ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) ในขณะนี้ปัจจุบันผู้ประกอบการปูนซีเมนต์รายใหญ่ของไทย ได้พัฒนากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงเดิมที่ใช้ถ่านหิน เป็นการเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลต่าง ๆ ซึ่งช่วยลดการปล่อย CO₂ ประมาณ 9 -12 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ปี เพื่อช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระทรวงอุตสาหกรรมประเมินว่าการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 1 ตัน สามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ 0.05 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เมื่อเทียบกับการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งสามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกได้รวมทั้งสิ้นประมาณกว่า 3 แสนตัน CO₂ [1]

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แก้วปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน เช่น เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่า เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิต

กระแสไฟฟ้า เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพบว่า แก้วปาล์มน้ำมันมีปริมาณของซิลิกา (SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูง เมื่อพิจารณาผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ในแก้วปาล์มน้ำมันพบว่าสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [2] ในขณะนี้ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องแก้วปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [3] ซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดังกล่าว ระบุดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ (Strength Activity Index, SAI) เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะต้องมิต่ำกำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 1 และไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 2 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ที่ผ่านมาแล้วว่าจะมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้แก้วปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งในประเทศและต่างประเทศแพร่หลาย โดยงานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นว่าแก้วปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีศักยภาพสูงในการทดแทนปูนซีเมนต์ เนื่องจากประกอบด้วยซิลิกาในรูป Amorphous ปริมาณมาก และสามารถเพิ่มสมบัติด้านดีของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ เช่น การเผาลดคาร์บอนตกค้าง และการบดละเอียดระดับไมโคร หรืออัลตราไฟน์ (Ultrafine POFA) ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว กระตุ้นปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทำให้เกิดเจล C-S-H มากขึ้น โดยงานวิจัยในปัจจุบันรายงานสอดคล้องกันว่า Ultrafine POFA ช่วย



บทความวิจัย

เพิ่มกำลังอัดระยะปลาย (28–90 วัน) ปรับปรุงความทนทานต่อการซึมน้ำและคลอไรด์ ลดค่าการดูดซึมน้ำและทำให้เนื้อคอนกรีตหนาแน่นขึ้น ในขณะที่ POFA บดหยาบอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถและกำลังช่วงต้น นอกจากนี้แนวโน้มปัจจุบันยังมุ่งใช้ POFA ร่วมกับ Fly Ash หรือ Limestone Powder (Ternary Binders) เช่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลและความทนทานของคอนกรีต ทำให้ POFA เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในงานคอนกรีตที่ยั่งยืน และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมก่อสร้าง [4] ในขณะที่งานวิจัยเหล่านั้นส่วนใหญ่พิจารณาถึงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ หรือคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 เท่านั้น [5-7] อีกทั้งการใช้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตยังไม่แพร่หลายมากนัก ต่างจากการใช้ถ่านหินซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก. 2594-2556)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านหินมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง ใช้ปาล์มน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง ในอัตราร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยนำน้ำหนักของวัสดุประสานในผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก ทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ทดสอบการดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่อายุการบ่ม 28 วัน นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) [8] เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนา

เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง และยังเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้ง ถือเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) อีกทั้งยังเป็นการช่วยจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ถ่านปาล์มน้ำมัน (OPOFA) ถ่านปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยคัดเลือกเฉพาะโรงงานที่ใช้เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าที่มาจากส่วนประกอบของปาล์มน้ำมันเท่านั้น แสดงในรูปที่ 1

ลักษณะทั่วไปของ OPOFA ก่อนบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 73.9 ไมโครเมตร มีสีดำปนเทา เนื้อถ่านหยาบ ไม่มีรูปทรงชัดเจน (รูปที่ 2-3) จากนั้นนำไปอบในตู้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อมานำถ่านปาล์มน้ำมันเข้าเครื่องบดแบบตกกระทบ (Los Angeles abrasion machine) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หรือ 12,000 รอบ จนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร ซึ่งลักษณะทั่วไปของ GPOFA มีสีดำสนิท เนื้อถ่านมีขนาดเล็กละเอียด (รูปที่ 4-5) โดยการกระจายตัวของอนุภาคของ OPOFA และ GPOFA แสดงในรูปที่ 6



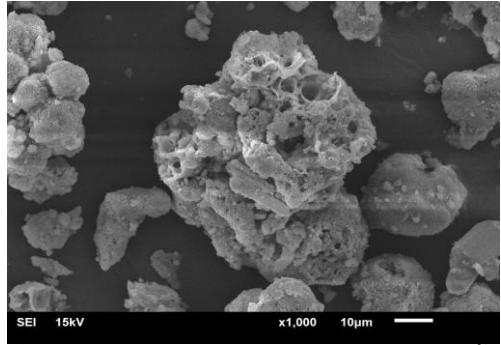
รูปที่ 1 โรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี



บทความวิจัย



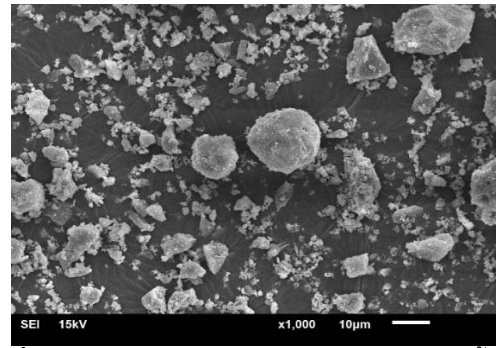
รูปที่ 2 แท่งปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA)



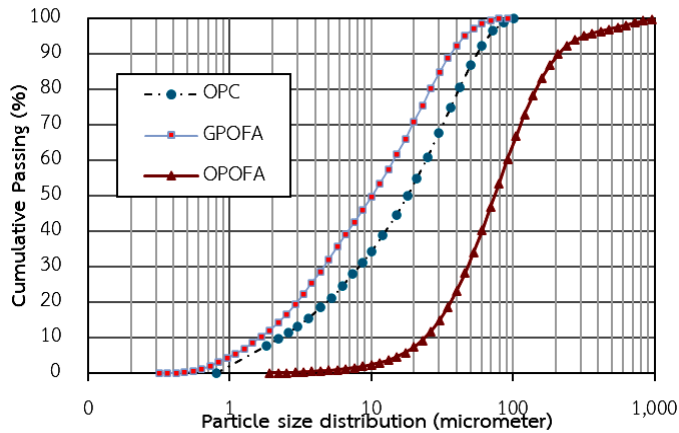
รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของแท่งปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4 แท่งปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของแท่งปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 6 การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), แท่งปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA) และ แท่งปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของ GPOFA พบว่า มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.6, 1.2 และ 2.8 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบ เท่ากับร้อยละ 61.6 แสดงในตารางที่ 1

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะทางเคมีของ GPOFA พบว่าอยู่ในเกณฑ์ชั้นคุณภาพที่ 1 ตามมาตรฐานสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์ม น้ำมันใช้เป็นตัวผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [3] เนื่องจากมีผลรวมขององค์ประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 10 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 12 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่า GPOFA อยู่ในประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 6.5 ซึ่งเกินร้อยละตามมาตรฐาน ASTM C618 ที่กำหนดค่า LOI ไม่เกินร้อยละ 6 อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้ผลรวมของออกไซด์หลักมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยา Hydration และ Pozzolanic reaction ของวัสดุผสม โดยทั่วไป GPOFA ที่ผ่านการบดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงชัน ทำให้อนุภาคสามารถปฏิกิริยาสำหรับการเกิดเจล C-S-H และเพิ่มความสามารถของ SiO_2 ใน GPOFA ให้ทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างเนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้นในระยะปลาย ซึ่งความละเอียดของ GPOFA เป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา Hydration โดยตรง โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติ

ทางเคมีของเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แสดงในตารางที่ 1

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แสดงใน รูปที่ 7 มีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ CaO และ SiO_2 มีค่าร้อยละ 62.6 และ 20.0 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า LOI ร้อยละ 2.8 โดยทั่วไปไม่มีสีเทาเข้ม เนื้อละเอียด มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีอนุภาคเล็กๆ เกะกะเป็นก้อนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 8 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 18.1 ไมโครเมตร โดยสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) แสดงในตารางที่ 1 [9] และรูปที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียด (GPOFA) [9]

Chemical Compositions (%)	OPC	GPOFA
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.0	57.6
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	4.6	1.2
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.8
Calcium Oxide (CaO)	62.6	9.6
Magnesium Oxide (MgO)	1.2	4.7
Potassium Oxide (K_2O)	2.7	8.7
Sodium Oxide (Na_2O)	0.3	0.1
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.4	2.2
Phosphorus Oxide (P_2O_5)	-	5.5
Chlorine (Cl)	-	1.1
Loss on Ignition (LOI)	2.8	6.5
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	61.6
Physical Properties		
Specific Gravity	3.16	2.65
Median Particle Size, d_{50} (μm)	18.1	7.7



บทความวิจัย

3. หินฝุ่น (Stone Dust, SD) หินฝุ่นจากโรงโม่หินในจังหวัดนครศรีธรรมราชโดยใช้ขนาดที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ลงมาจนถึงส่วนที่เป็นฝุ่น แสดงในรูปที่ 9 พบว่าหินฝุ่นมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.78 ค่าความถ่วงจำเพาะอิมตัวผิวแห้งเท่ากับ

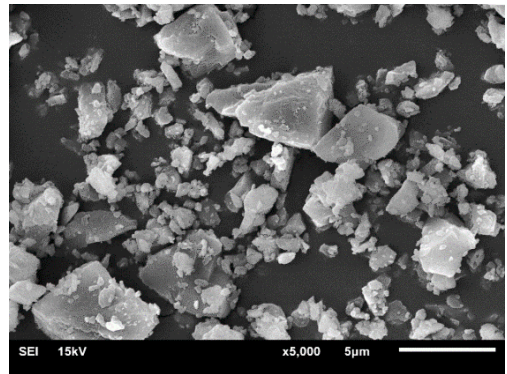
และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.84 โดยมวลรวมละเอียดอยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) โดยคุณสมบัติทางกายภาพของหินฝุ่น และการกระจายตัวของอนุภาค แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของหินฝุ่น

Fine Aggregate	Specific Gravity	Finess Modulus (F.M.)	Water Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)
Stone Dust	2.74	2.78	0.84	1,670



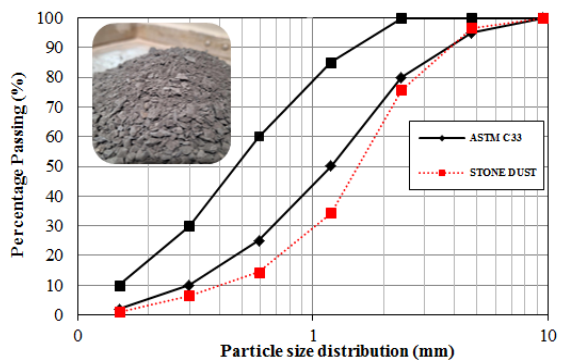
รูปที่ 7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)



รูปที่ 8 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) กำลังขยาย 5,000 เท่า [9]



รูปที่ 9 หินฝุ่น (Stone Dust, SD)



รูปที่ 10 การกระจายตัวของอนุภาคของหินฝุ่น (Stone Dust, SD)



2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

กำหนดอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (ปูนซีเมนต์+เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด : หินฝุ่น) เท่ากับ 1 : 6 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือ ร้อยละ 0, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ใช้ในการทดสอบของแต่ละอัตราส่วนผสมหาได้จากการทดสอบความชื้นเหลว โดยกำหนดให้ค่าความชื้นเหลวที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตล้วนเป็นตัวควบคุม โดยอัตราส่วนผสมต่อลูกบาศก์เมตร และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยแสดงใน ตารางที่ 3

วัสดุประสานและวัสดุมวลรวม โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานซึ่งได้จากการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตล้วนเป็นตัวควบคุม (W/B) เท่ากับ 0.40 ของทุกอัตราส่วน โดยการค่อยๆ เติมน้ำลงในไม่ผสม ดังแสดงใน รูปที่ 11 เมื่อมวลรวมกันดีแล้วจึงทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องอัดคอนกรีตบล็อกขนาด 70 × 190 × 390 มม. ดังแสดงใน รูปที่ 12 หลังจากทำการอัดบล็อกเรียบร้อยแล้วนำไปเก็บในที่ร่ม พร้อมทั้งทำการผ่านน้ำและห่อหุ้มคอนกรีต



รูปที่ 11 การผสมคอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องผสมคอนกรีต

บล็อกด้วยพลาสติกเพื่อทำการบ่มชื้น ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก เลขที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 58-2560 [8] เพื่อสำหรับทดสอบการรับแรงอัดที่อายุ 7, 28, และ 56 วัน (รูปที่ 13) และทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน

นำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกที่ได้เตรียมไว้ไปทำการทดสอบหาค่าต่าง ๆ โดยอ้างอิงรายละเอียดการทดสอบ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีสู่มตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อสร้างซึ่งทำด้วยคอนกรีต มอก. 109-2517 และ มอก. 58-2560 [8]

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่าง

Mixture	Mix Proportion (kg/m ³)				Compressive Strength (Blocks)			Water Absorption (Blocks)	Total (Blocks)
	OPC	GPOFA	SD	Water	7 Days	28 Days	56 Days	28 Days	
CT	156.0	-	936.0	62.4	5	5	5	5	20
50GPOFA	78.0	78.0	936.0	62.4	5	5	5	5	20
60GPOFA	58.5	97.5	936.0	62.4	5	5	5	5	20
70GPOFA	39.0	117.0	936.0	62.4	5	5	5	5	20



รูปที่ 12 เครื่องอัดคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 13 การทดสอบการรับแรงอัดคอนกรีตบล็อก

การประเมินราคาวัสดุของคอนกรีตบล็อก ได้จาก ผลคูณระหว่างปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต บล็อก กับราคาวัสดุที่สืบค้นในท้องตลาด ณ ปัจจุบัน ต่อปริมาณคอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งราคา ดังกล่าวยังไม่รวมค่าเครื่องจักร ค่าแรง และค่าขนส่ง ผลผลิตภัณฑ์

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต บล็อก โดยใช้ข้อมูลที่รวบรวมจากบัญชีรายการ สิ่งแวดล้อม เพื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยค่า Emission Factor ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยแสดง ในตารางที่ 4 ได้ข้อมูลมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [10-13] และพื้นฐานแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) โดยอ้างอิงการคำนวณ

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ของวัสดุ (Emission Factor)

Materials	Emission Factor/kg	Ref
Ordinary Portland Cement	0.847	[10]
Ground Palm Oil Fuel Ash	0.106	[11]
Stone Dust	0.008483	[12]
Water	0.0003238	[13]

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากข้อกำหนดและ แนวทางการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ จัดทำโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า (CO₂) จำนวนได้จากผลคูณระหว่างปริมาณ วัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก กับค่าสัมประสิทธิ์ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$CO_2 = \text{ปริมาณวัสดุ} \times \text{Emission Factor} \quad (1)$$

โดยเมื่อพิจารณาค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ วัสดุ (Emission Factor) ของ GPOFA ซึ่ง เป็นผลรวม ของการปล่อยก๊าซจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การเตรียม POFA เช่น การอบ การบด และการขนส่ง ในกรณีนี้ใช้รถบรรทุกขนส่ง POFA จำนวน 1,000 กิโลกรัม จากโรงงานปาล์มน้ำมันที่ใกล้ที่สุดไปยัง ห้องปฏิบัติการระยะทางประมาณ 50 กม. โดยใช้ อัตราการปล่อยก๊าซจากการขนส่งเท่ากับ 0.192 กก. CO₂/กม. นอกจากนี้การอบแห้ง POFA ใช้เวลา 24 ชั่วโมงในเตาอบ โดยประมาณการการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 1,041.67 วัตต์ต่อชั่วโมง และใช้พลังงาน 149.7 kWh สำหรับการร้อนและการบดละเอียด [11]



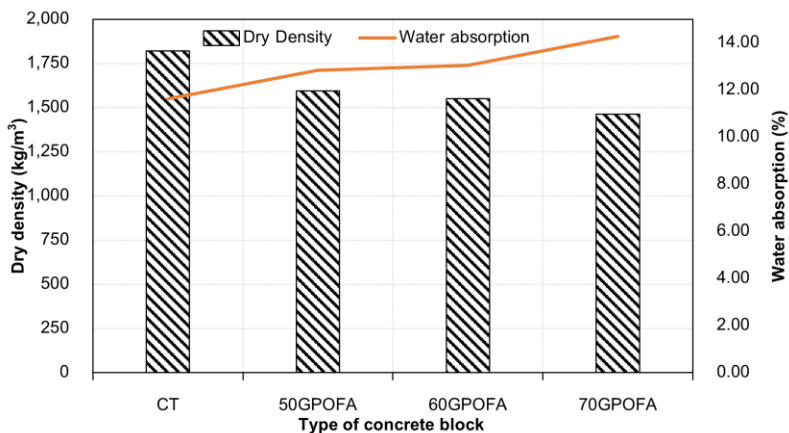
3. ผลการวิจัย

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 14 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (CT) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1,821 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ในอัตราส่วนร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1,595, 1,551 และ 1,464 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 88, 85 และ 80 ของคอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกจะลดลง เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.65 มีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

(OPC) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.15 เมื่อนำ GPOFA มาแทนที่ OPC ในปริมาณสูงจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลง [5-7]

ในขณะที่เมื่อพิจารณาอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อก ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตบล็อก CT, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 11.63, 12.83, 13.04 และ 14.28 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก GPOFA เป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งมีความพรุนสูง ส่งผลให้มีอัตราการดูดซึมน้ำที่มากกว่า OPC และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ยกับอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกจะเห็นว่า ความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกแปรผกผันกับอัตราการดูดซึมน้ำ กล่าวโดยสรุปคือ เมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกลดลง เนื่องจากปริมาณช่องว่างในคอนกรีตบล็อกมีมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก



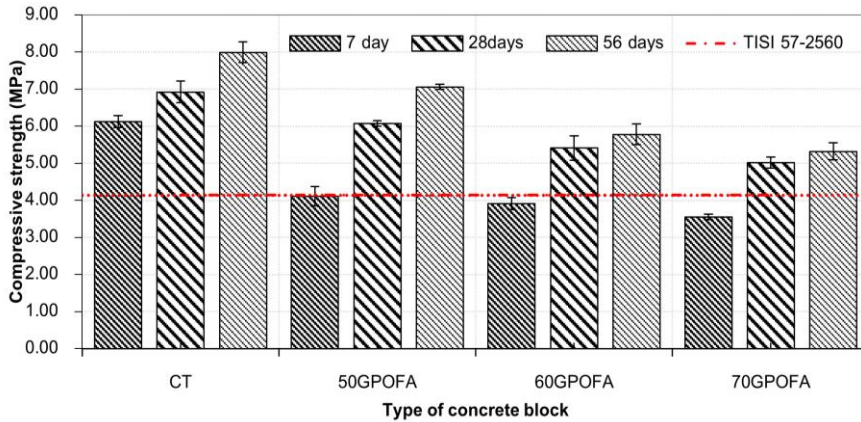
สอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoenatkul [7] และงานวิจัยของ Salaemae และคณะ [14] ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณของเถาปาล์มน้ำมันส่งผลให้ความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานและคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลง และมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการแทนที่ของเถาปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้มีการดูดกลืนน้ำที่มากกว่า นอกจากนี้เนื่องจากเถาปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่เป็นวัสดุปอซโซลานนั้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ทำได้อากกว่าอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้เกิดช่องว่างของอิฐบล็อกประสานมากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานลดลงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) [8] ซึ่งแบ่งประเภทความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก พบว่าคอนกรีตบล็อก CT มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1,821 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จัดอยู่ในประเภทน้ำหนักปานกลาง (Medium Weight, M) เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,680-2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA จัดอยู่ในประเภทน้ำหนักเบา (Light Weight, L) เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า 1,680 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในส่วนของอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกซึ่งใน มาตรฐาน มอก. 58-2560 มีได้กล่าวถึงไว้ นั่น หากพิจารณาคอนกรีตบล็อก CT, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA พบว่ามีค่าอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกิน ร้อยละ 25 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2533 กำหนด

3.2 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 15 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (CT) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 6.12, 6.92 และ 7.99 เมกาปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่อายุการบ่ม 7 วัน คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.11, 3.91 และ 3.55 เมกาปาสคาล ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 67, 64 และ 58 คอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตบล็อกที่ผสมเถาปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีปริมาณของ OPC ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิโคนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ GPOFA เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะต้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุ 7 วัน มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตบล็อก CT ก่อนข้างมาก [10, 15] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 58-2560 [8] ซึ่งระบุความต้านแรงอัดสุทธิเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4.14 เมกาปาสคาล นอกจากนี้คอนกรีตบล็อกที่ใช้ระบบอัดแห้งที่มีปริมาณน้ำต่ำ จึงทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic ของวัสดุปอซโซลานเกิดช้าลง การใช้วัสดุ GPOFA ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานจะยิ่งลดความสามารถในการรับกำลังอัดช่วงต้น จึงต้องการวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดมาก และกระจายตัวดี ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิด Hydration การอัด และความแข็งแรงของคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 15 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน

เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่ม 28 วัน คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 6.07, 5.41 และ 5.02 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 88, 78 และ 73 คอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนด เนื่องจาก GPOFA มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตบล็อกมีความแน่นขึ้น นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งได้ผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือ C-S-H จากการทำปฏิกิริยา โดย C-S-H มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน สามารถช่วยในการพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 และ 56 วัน ได้มากขึ้น [5-7, 9, 15] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่า มีแนวโน้มใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sooksatra และ Premkamol [16] ซึ่งศึกษาคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันมาทดแทนปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ของวัสดุประสานโดยน้ำหนัก ผลของการศึกษาพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลงเมื่อ

ปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันมีมากขึ้นนอกจากนี้ยังพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันมาทดแทนปูนซีเมนต์ในวัสดุประสานของการศึกษามีค่ามากกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนัก ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533.

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก

ผลการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างความหนาแน่น อัตราการดูดซึมน้ำ และกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกผสม GPOFA โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) พบว่าค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลงร้อยละ 88, 85 และ 80 ของคอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการดูดซึมน้ำคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-23 สะท้อนถึงโครงสร้างที่มีความ



พูนสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในอายุ 7 วัน (ลดลงร้อยละ 33–42) เนื่องจากระบบอัดแห้งมีน้ำต่ำและมีปริมาณ OPC ลดลง ทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic เกิดขึ้นจำกัดในระยะแรก อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่อายุช่วงปลายที่ 28 และ 56 วัน กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกผสม GPOFA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าประมาณร้อยละ 73–88 ของคอนกรีตบล็อก CT ที่อายุ 28 วัน เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดของ GPOFA สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างและปฏิกิริยา pozzolanic เริ่มส่งผลต่อการสร้าง C-S-H เพิ่มเติม ส่งผลให้โครงสร้างเนื้อคอนกรีตหนาแน่นขึ้น แต่ภาพรวมยังคงสอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อความหนาแน่นลดลง อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และค่ากำลังอัดลดลงตามลำดับ แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงลบของสามตัวแปรที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณ GPOFA ในส่วนผสม

3.4 การประเมินราคาวัสดุของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 16 แสดงการวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง โดยราคาวัสดุของการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งประกอบด้วย OPC เท่ากับ 3,300 บาท/ตัน (165 บาท ต่อ ปูนซีเมนต์ 1 กระสอบ) ในขณะที่ GPOFA ซึ่งมีค่าการขนส่ง, ค่าแรงงานขนย้าย (ระยะทางไม่เกิน 200 กิโลเมตร) และค่าพลังงานในการบด ประมาณ 522 บาท/ตัน หินฝุ่น 280 บาท/ตัน และน้ำสะอาด 32 บาท/ตัน [9-10, 15] จากการประเมินราคา พบว่าคอนกรีตบล็อก CT มีราคาเท่ากับ 778.1 บาท/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีราคาเท่ากับ 561.6, 518.7 และ 473.9 บาท/ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 72, 67 และ 61 ของคอนกรีตบล็อก CT

ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าราคารวมของคอนกรีตบล็อกลดลงเมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้นหรือคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ประมาณร้อยละ 28-39 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อก CT ซึ่งราคาดังกล่าวยังไม่รวมค่าเครื่องจักร ค่าแรง และค่าขนส่งผลิตภัณฑ์

3.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตบล็อก

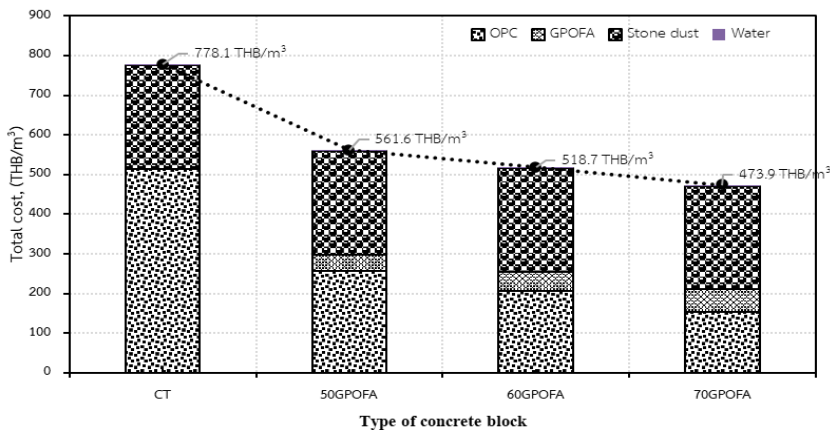
ข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 17 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณการปล่อย CO_2 ของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงลดลง เมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตบล็อก CT มีปริมาณการปล่อย CO_2 จากวัสดุ เท่ากับ 140.1 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีปริมาณการปล่อย CO_2 เท่ากับ 82.3, 67.8 และ 53.4 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 58, 48 และ 38 ของคอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ โดยปริมาณการปล่อย CO_2 ของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ OPC, GPOFA, หินฝุ่น และ น้ำ มีปริมาณเท่ากับ 0.847, 0.1006, 0.008483 และ 0.0003238 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/กิโลกรัมตามลำดับ [10-13] จากการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อย CO_2 ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแต่ละส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าหากมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงในผลิตภัณฑ์



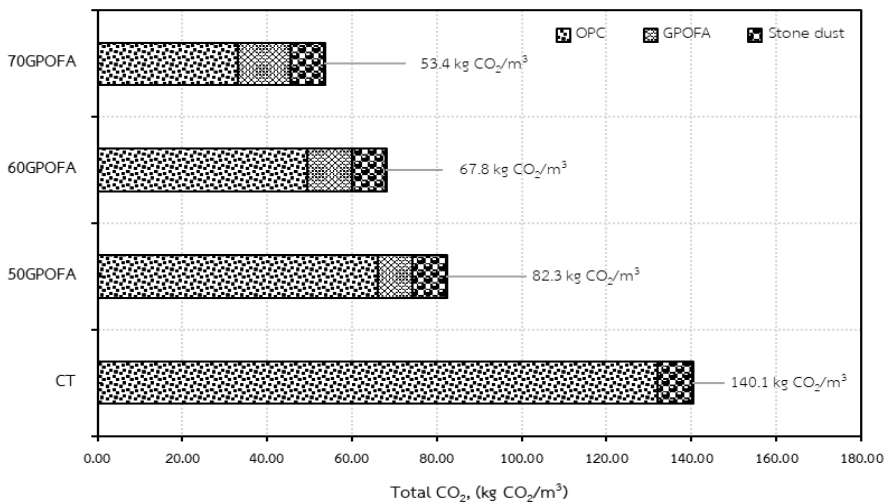
บทความวิจัย

คอนกรีตบล็อกจะสามารถลดปริมาณการปล่อย CO₂ ได้มากถึงร้อยละ 41-62 ในขณะที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ตรงตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) กำหนด และจะส่งผลโดยตรงต่อการลดการปล่อย CO₂ ที่เกิดจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็น

อุตสาหกรรมที่ปล่อย CO₂ สูงถึงร้อยละ 5-7 ของ CO₂ ทั้งหมดที่ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลกให้มีปริมาณลดลง สนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน และการต่อสู้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals -SDGs) [17-19]



รูปที่ 16 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 17 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร



4. สรุปผลและอภิปรายผล

การศึกษาผลกระทบของเก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงต่อการรับกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถสรุปผลให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

1. คอนกรีตบล็อกที่ผสมเก่าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงมีความหนาแน่นเฉลี่ยลดลง ในขณะที่มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ

2. เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในปริมาณสูงได้ โดยคอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีค่ากำลังอัดผ่านตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) กำหนด ที่อายุ 28 ในขณะที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 50, 40 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น

3. คอนกรีตบล็อกที่ใช้เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนวัสดุโดยรวมของคอนกรีตบล็อก ได้ประมาณร้อยละ 28 ถึง 39 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

4. คอนกรีตบล็อกที่ใช้เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง สามารถลดปริมาณการปล่อย CO₂ ในการผลิต ได้มากถึงร้อยละ 41 ถึง 62 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

5. การใช้เก่าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 70 (70GPOFA) สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 5.02 เมกะปาสกาล อายุ 28 วัน ผ่านมาตรฐาน มอก. 58-2560 และสามารถลดต้นทุนได้ถึงร้อยละ 39 รวมถึงลดการปล่อย CO₂ ได้ถึงร้อยละ 62 ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นวัสดุประสานที่มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 6 ซึ่งจัดเป็นอัตราส่วนที่ให้ปริมาณวัสดุประสานสูง ซึ่งทั่วไปอยู่ในช่วง 1:6-1:11 โดยการเพิ่มปริมาณมวลรวม (เช่น 1:8-1:11) อาจทำให้คอนกรีตบล็อกมีความหนาแน่นลดลง ความพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัด และความต้านทานการดูดซึมน้ำลดลง ในด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุประสานในปริมาณสูงจะส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการผลิตสำหรับต้นทุน ของคอนกรีตบล็อกอัตราส่วน 1:6 มีต้นทุนสูงกว่าเพราะใช้ปูนซีเมนต์มาก การเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมละเอียด มีราคาถูกที่สุดต่อก่อนและนิยมในงานบล็อกราคาประหยัด แต่คุณภาพต่ำกว่า ดังนั้นอัตรา 1:6 ในงานวิจัยนี้เป็นส่วนผสมที่เน้นความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่สูงกว่าในทางปฏิบัติจะส่งผลต่อคุณสมบัติ สิ่งแวดล้อม และต้นทุนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ



บทความวิจัย

หลักสูตรวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/construction-construction-materials/construction-materials/io/2024> (Accessed on 24 September 2024) (in Thai)
- [2] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, 2017.
- [3] TIS 2888-2561, Standard for Palm Oil Ash for Use as Admixture in Concrete, 2019. (in Thai)
- [4] A.N.B.M. Sufian, M.R. Rahman, K.A.B. M. Said and M.K.B. Bakri, A critical review of various types of palm oil fuel ash (POFA) utilization in enhancing concrete and mortar properties, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2025, 10(2), 124.
- [5] W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash, *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(10), 767–774.
- [6] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7), 2641–2646.
- [7] C. Charoennatkul, Interlocking blocks containing oil palm ash and shells waste, *Journal of Community Development and Life Quality*, 2014, 2(1), 103 – 117. (in Thai)
- [8] TIS 58-2560, Standard for Hollow Non-load-Bearing Concrete Masonry Blocks, 2017. (in Thai)
- [9] N. Sompakdee, T. Klathae, C. Choosakul, S. Rittipakdee, P. Khamput and S. Dueramae, Compressive strength of cement mortar containing high volume palm oil fuel ash, *The 28th National Convention on Civil Engineering (NCCE28)*, Proceeding, 2023, MAT35-1–MAT35-7. (in Thai)
- [10] P. Chindaprasirt, W. Kroehong, N. Damrongwiryanupap, W. Suriyo and C. Jaturapitakkul, Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash, *Journal of Building Engineering*, 2020, 31, 101415.



- [11] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra and R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203, 822–835.
- [12] X. Zhu, Y. Zhang, Z. Liu, H. Qiao, F. Ye and Z. Lei, Research on carbon emission reduction of manufactured sand concrete based on compressive strength, *Construction and Building Materials*, 2023, 403, 133101.
- [13] http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_f2e7bb377d.pdf. (Accessed on 14 September 2024) (in Thai)
- [14] P. Salaemae, K. Ongwuttiwat and A. Hawa, Thermal insulation hollow concrete blocks using palm oil clinker containing surgical face masks and KF94 masks as aggregate, *The Journal of Industrial Technology*, 2025, 21(2), 91–106.
- [15] S. Men, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and C.C. Ban, Strength, fluid transport and microstructure of high-strength concrete incorporating high-volume ground palm oil fuel ash blended with fly ash and limestone powder, *Journal of Building Engineering*, 2022, 56, 104714.
- [16] V. Sooksatra and N. Premkamol, Usage of palm oil ash in producing non-load concrete block, *Engineering Journal of Siam University*, 2021, 22(1), 1–10.
- [17] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra and R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203, 822–835.
- [18] R.V. Leeuwen, The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete, *Journal of Civil Engineering*, 2016, 6(4), 104–113.
- [19] C. Witthayaphirom, N. Nuansawan and C. Chiemchaisri, Assessing waste generation rate from activities in high-rise building construction for achieving sustainable construction goals, *The Journal of Industrial Technology*, 2025, 21(1), 1–14.