บทความวิจัย

กำลังอัดและความทนทานของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดบริเวณพื้นที่พรุ

ปกป้อง รัตนชู อรรคเดช อับดุลมาติน* อาบีเด็ง ฮาวา กฤติยา อ่องวุฒิวัฒน์ และ ปรีชา สะแลแม
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ จังหวัดนราธิวาส
เซาฟีร์ ดือราแม
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ จังหวัดกรุงเทพมหานคร

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7370 9030 ต่อ 3200-1 อีเมล: akkadath.a@pnu.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.001
รับเมื่อ 29 กันยายน 2564 แก้ไขเมื่อ 26 พฤศจิกายน 2564 ตอบรับเมื่อ 16 ธันวาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 7 มิถุนายน 2567
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษากำลังอัด การสูญเสียกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการขยายตัวของมอร์ต้าที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดบริเวณพื้นที่พรุในพื้นที่จังหวัดนราธิวาส เถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนในส่วนผสมของมอร์ต้า โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 25 35 50 และ 65 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุมีแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไป โดยมอร์ต้ามีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 108 108 106 และ 109 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความทนทานของมอร์ต้าที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สามารถช่วยลดการสูญเสียกำลังอัดและสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าได้ นอกจากนี้การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่เกินร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สามารถช่วยลดการขยายตัวของมอร์ต้าได้ และให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าควบคุม จะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สามารถช่วยลดการสูญเสียกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการขยายตัวของมอร์ต้าที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุ และให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าควบคุม ตลอดจนสามารถช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของมอร์ต้าส่งผลให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: สภาพแวดล้อมกรดบริเวณพื้นที่พรุ กำลังอัด ความทนทาน เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด มอร์ต้า

การอ้างอิงบทความ: ปกป้อง รัตนชู, อรรคเดช อับดุลมาติน, อาบีเด็ง ฮาวา, กฤติยา อ่องวุฒิวัฒน์, ปรีชา สะแลแม และ เซาฟีร์ ดือราแม, "กำลังอัดและความทนทานของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดบริเวณพื้นที่พรุ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 1–14, เลขที่บทความ 243-095497, ก.ค.–ก.ย. 2567.

Research Article

Compressive Strength and Durability of Mortar Used Ground Palm Oil Fuel Ash as Pozzolanic Material Exposed to Acidic Peat Environment

Pokpong Rattanachu, Akkadath Abdulmatin*, Abideng Hawa, Krittiya Ongwuttiwat and Preecha Salaemaea
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, Thailand
Saofee Dueramae
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7370 9030 Ext. 3200-1, E–mail: akkadath.a@pnu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.001
Received 29 September 2021 ; Revised 26 November 2021 ; Accepted 16 December 2021; Published online: 7 June 2024
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study the compressive strength and durability in terms of strength loss, weight loss and expansion of mortars exposed to the acidic peat environment in Narathiwat province. Palm oil fuel ash, a by-product acquired from a palm oil factory, was used as a cement replacement in mortar. Ground Palm Oil Fuel Ash (GPOFA) was used to partially replace Ordinary Portland Cement type I (OPC) at 25, 35, 50 and 65% by weight of cement. The results indicated that the use of GPOFA to replace OPC could promote the compressive strength of the mortar exposed to acidic peat environment. Especially, the use of GPOFA as 25% by weight of cement to replace OPC yielded greater mortar compressive than the control mortar exposed to acidic peat environment at the age of 7 days and more. The compressive strength of the mortar at 7, 28, 60 and 90 days accounted for 108, 108, 106 and 109% of the control mortar. Considering the durability of mortar exposed to acidic peat environment, the strength loss and weight loss of mortar could be decreased by utilization of GPOFA for up to 35% of cement replacement. In addition, the use of GPOFA up to 65% by weight of cement to replace OPC could decrease the expansion of the mortar, which was lower than that of the control mortar. It is concluded that the use of GPOFA as 35% by weight of cement to replace OPC could reduce the strength loss, weight loss and the expansion of the mortar exposed to acidic peat environment. The outcomes showed lower and better values than those of the control specimen. In addition, the reduction of the cement content in mortars by the use of GPOFA for up to 35% of cement replacement leads to lowering production costs while encouraging environmentally conscious practices.

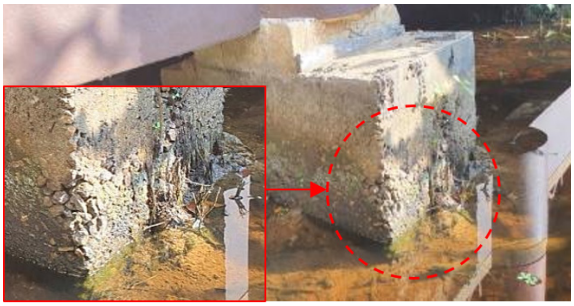
Keywords: Acidic Peat Environment, Compressive Strength, Durability, Ground Palm Oil Fuel Ash, Mortar

Please cite this article as: P. Rattanachu, A. Abdulmatin, A. Hawa, K. Ongwuttiwat, P. Salaemaea, and S. Dueramae, "Compressive strength and durability of mortar used ground palm oil fuel ash as pozzolanic material exposed to acidic peat environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 3, pp. 1–14, ID. 243-095497, Jul.–Sep. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

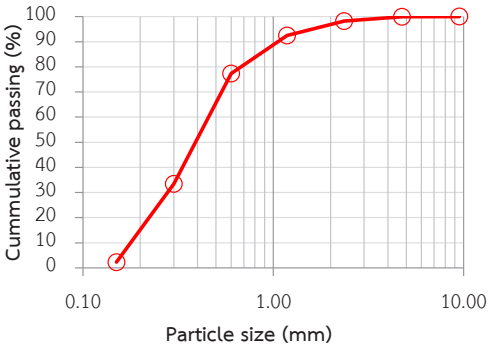
คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้างทั้งในอดีตและปัจจุบัน โดยในการผลิตคอนกรีตยังคงใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานหลัก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก ใน พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 25 ล้านตัน [1] หมายความว่าประเทศไทยมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศจากการผลิตปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 16.5–22.0 ล้านตัน/ปี (การผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.66–0.88 ตัน/ตัน-ซีเมนต์ [2]) ด้วยเหตุนี้การใช้วัสดุปอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนหรือปริมาณสูงในการผลิตคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะเป็นการช่วยลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศมีปริมาณที่ลดลง

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานงานปาล์มน้ำมัน ใน พ.ศ. 2561 ผลผลิตปาล์มน้ำมันในประเทศไทยมีมากถึง 16.4 ล้านตัน โดยที่ 14.8 ล้านตัน เป็นผลผลิตที่ได้จากทางภาคใต้ของประเทศไทย [3] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4] พบว่า หลังจากการกลั่นน้ำมันปาล์มทำให้เกิดกากปาล์มน้ำมันประมาณร้อยละ 50 ของวัตถุดิบ และเมื่อนำกากปาล์มน้ำมันไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณร้อยละ 5 ของกากปาล์มน้ำมัน จะเห็นได้ว่าหากไม่มีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์จะทำให้เกิดปัญหาทางมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การเกิดฝุ่นละอองจากเถ้าปาล์มน้ำมันบริเวณโดยรอบของที่ตั้งโรงงาน นอกจากนี้ยังมีต้นทุนในการจัดการหาพื้นที่ในการทิ้ง ดังนั้นการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนหรือใช้ในปริมาณสูงจะช่วยลดของเสียจากโรงงานปาล์มน้ำมัน อีกทั้งเป็นการช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ลดลง ตลอดจนการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาได้รับการยืนยันว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้ละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตได้ [5]–[7]



รูปที่ 1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในบริเวณสภาพแวดล้อมพรุ

พื้นที่ป่าพรุในประเทศไทยมีกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ภาคใต้ โดยเฉพาะพื้นที่ราบลุ่มในจังหวัดนราธิวาสส่วนใหญ่มีสภาพเป็นป่าพรุ พื้นที่ป่าพรุเป็นสภาพแวดล้อมที่มีน้ำขังและมีการทับถมกันของซากพืช พื้นดินชั้นล่างมีสารประกอบจำพวกกำมะถันทำให้ทั้งดินและน้ำบริเวณนั้นมีสภาพความเป็นกรดสูง (มีสภาพความเป็นกรด-ด่าง อยู่ประมาณ 3–6) [8]–[10] ปัจจุบันมีการขยายพื้นที่ตัวเมืองออกไปในพื้นที่ป่าพรุเพื่อรองรับประชากรที่มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีต (ซึ่งมีความเป็นด่างสูง) ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดของน้ำและดินในป่าพรุอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ (แสดงดังรูปที่ 1) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานจะทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตลดลงซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดได้ดีขึ้น Sata และคณะ [11] ได้ศึกษาการต้านทานกรดของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 และใช้เถ้าก้นเตาเป็นมวลรวมหยาบ โดยนำตัวอย่างไปแช่ในกรดซัลฟูริคเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักพบว่า มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยสามารถต้านทานกรดได้ดีกว่ามอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดของคอนกรีตได้ [6], [12], [13]



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาคทรายแม่น้ำ

ด้วยเหตุนี้จึงสันนิฐานได้ว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถทำให้มอร์ต้าหรือคอนกรีตมีความต้านทานสภาพความเป็นกรดในพื้นที่พรุได้ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของมอร์ต้าเพื่อประเมินความคงทนของมอร์ต้าในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดของพื้นที่ป่าพรุในจังหวัดนราธิวาส อีกทั้งเป็นการช่วยส่งเสริมให้มีการนำขยะหรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ใช้เป็นวัสดุประสานหลัก และเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานปาล์มน้ำมันนิคมบาเจาะ จ.นราธิวาส ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด (ซึ่งบรรจุลูกเหล็ก (Ball Mill) ภายในเพื่อช่วยเพิ่มความละเอียดในการบด) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จนมีความละเอียดของอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (GPOFA) ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมของมอร์ต้า

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ (Sand) ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่สุดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคแสดงในรูปที่ 2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.48 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.59 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.00

การผสมตัวอย่างมอร์ต้าในแต่ละการทดสอบใช้น้ำประปาเป็นส่วนผสม สำหรับการบ่มมอร์ต้าจะบ่มในน้ำประปาและบ่มในน้ำที่สภาพแวดล้อมจริงบริเวณพื้นที่พรุ

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ส่วนผสมมอร์ต้าในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 โดยมอร์ต้าควบคุม (CT) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่วนผสมคอนกรีตที่เหลือใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 35 50 และ 65 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (PA25, PA35, PA50 และ PA65) โดยมอร์ต้าทุกส่วนผสมจะใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก น้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.5 และควบคุมค่าการไหลแผ่ (Flow) ของมอร์ต้าไว้ที่ร้อยละ 105–115 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [14] โดยมอร์ต้าที่แข็งตัวแล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกจะถูกนำไปบ่มในน้ำประปาโดยทำการทดสอบในห้องวิจัย และกลุ่มที่สองจะถูกนำไปบ่มในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในบริเวณพื้นที่พรุ ณ ศูนย์ศึกษาพัฒนาพิกุลทองอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดนราธิวาส โดยค่า pH ตลอดระยะเวลาการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมของมอร์ต้าที่ใช้ในทำวิจัย

มอร์ต้าร์	วัสดุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			อัตราส่วน W/B	การไหลแผ่ (%)
	OPC	GPOFA	ทราย		
CT	100	-	275	0.500	105.5
PA25	75	25	275	0.500	106.3
PA35	65	35	275	0.545	105.3
PA50	50	50	275	0.553	114.8
PA65	35	65	275	0.553	108.4

ตารางที่ 2 ค่า pH ของน้ำในบริเวณพื้นที่พรุ

เดือน	pH
มิถุนายน 2563	2.61
กรกฎาคม 2563	2.87
สิงหาคม 2563	3.16
กันยายน 2563	3.79
ค่าเฉลี่ย	3.11

2.3 วิธีการวิจัย

2.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนทำการบดและหลังทำการบดจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดอนุภาคโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C430 [15] ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188 [16] วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy; SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-ray Fluorescence Spectrometry; XRF

2.3.2 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้า

ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [17] โดยการทดสอบนี้แบ่งมอร์ต้าออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ มอร์ต้าที่บ่มในน้ำประปาและมอร์ต้าที่แช่ในน้ำพรุซึ่งมีสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นกรด เพื่อเปรียบเทียบผลของการสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน โดยในแต่ละอายุการทดสอบของแต่ละส่วนผสมใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

2.3.3 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้า

ผลกระทบด้านการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุจะประเมินในรูปแบบของค่าร้อยละความแตกต่างของน้ำหนักที่หายไปของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นมอร์ต้า (ก่อนบ่มในน้ำพรุ) จนกระทั่งอายุที่ 90 วัน ซึ่งค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าได้จากค่าเฉลี่ยจากมอร์ต้าจำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อส่วนผสมตลอดอายุการทดสอบ โดยใช้มอร์ต้าขนาด 5×5×5 ซม.

2.3.4 การเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งมอร์ต้า

หล่อมอร์ต้าเป็นแท่งขนาดพื้นที่หน้าตัด 2.5×2.5 ตร.ซม. ยาว 28.5 ซม .ตามมาตรฐาน ASTM C490M [18] ใช้แท่งมอร์ต้าจำนวน 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสมตลอดอายุการทดสอบ หลังจากหล่อมอร์ต้าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัวอย่างมอร์ต้าจะถูกวัดความยาวเริ่มต้นและนำไปบ่มน้ำพรุ จากนั้นทำการวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของมอร์ต้าที่อายุ 3 7 14 21 28 และทุก ๆ 14 วัน จนกระทั่งมอร์ต้ามีอายุ 90 วัน สามารถคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปได้จากสมการที่ (1) โดยค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงได้จากค่าเฉลี่ยจากมอร์ต้าจำนวน 3 ตัวอย่าง

$$L = (L_x - L_i)/L_g \quad (1)$$

เมื่อ L คือ ค่าเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งมอร์ต้า
L_x คือ ความยาวของแท่งมอร์ต้าที่ระยะเวลาใด ๆ
L_i คือ ความยาวเริ่มต้นของแท่งมอร์ต้าเริ่มต้น
L_g คือ ความยาวของแท่งอ้างอิง

3. ผลการทดลอง

3.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 3 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคของวัสดุประสานพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA) ที่ได้มาจากโรงงานมีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (Weigh Retained on a No.325 Sieve) ร้อยละ 39.3 โดยน้ำหนัก และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 1.94 หลังจากนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้ละเอียดโดยเครื่องบดพบว่า มีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ลดลงเหลือร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก (GPOFA) และส่งผลให้มีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.50 เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดและหลังทำการบดมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่ขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 มากกว่า 2 เท่า และเมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปทำการบดแล้วพบว่า มีน้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 ที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประมาณ 17 เท่า ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพในส่วนผสมของคอนกรีตได้ [19], [20]

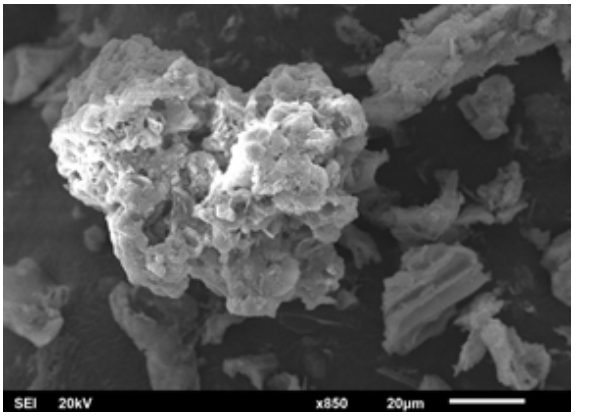
ตารางที่ 3 ค่าความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคของวัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพ	OPOFA	GPOFA	OPC
ความถ่วงจำเพาะ	1.94	2.50	3.15
ปริมาณค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325	39.30	1.20	19.90

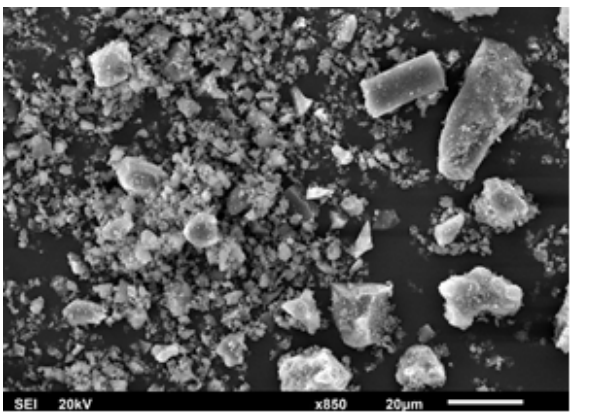
เมื่อพิจารณารูปร่างอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันจากการทดสอบด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy; SEM แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (รูปที่ 3 (ก)) มีขนาดค่อนข้างใหญ่ มีรูปร่างค่อนข้างมนและมีรูพรุนสูง หลังจากทำการบด (รูปที่ 3 (ข)) พบว่า ส่งผลให้เถ้าปาล์มน้ำมันมีขนาดอนุภาคเล็กลง มีรูพรุนลดลง และยังคงมีรูปร่างค่อนข้างกลมมน

3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ (แสดงดังตารางที่ 4) พบว่ามี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 63.6 และมีผลรวมของปริมาณ SiO_2, $Al2O_3$ และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 69.1 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [19], [21], [22] ที่พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมี SiO_2 ประมาณร้อยละ 55–65 และมีผลรวมของปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 65–70 ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 1.0 ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากเทคโนโลยีในการเผาในปัจจุบันพัฒนามากขึ้น ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของปาล์มน้ำมัน สามารถช่วยลดค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2888 (TIS 2888) [23] พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันในงานวิจัยนี้มีค่าผลรวมของปริมาณ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 สูงกว่าร้อยละ 50 ปริมาณของ CaO และ LOI มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 และ 12 ตามลำดับ ตามมาตรฐานกำหนด อย่างไรก็ตามปริมาณ SO_3 มีค่าสูงกว่ามาตรฐานอยู่เล็กน้อย



(ก) เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด

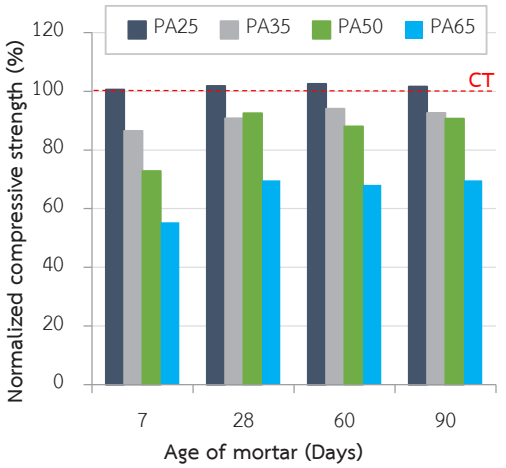


(ข) เถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด

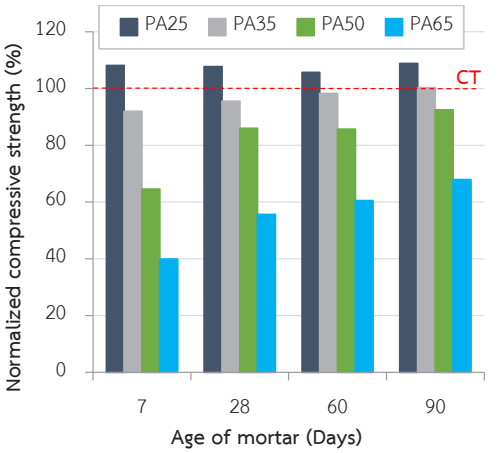
รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.3 กำลังอัดของมอร์ต้า

ตารางที่ 4 และรูปที่ 4 พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้มอร์ต้ามีกำลังอัดในช่วงอายุต้นต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยที่อายุ 7 วัน มอร์ต้า PA25 PA35 PA50 และ PA65 มีกำลังอัดเท่ากับ 364 313 264 และ 200 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 100 87 73 และ 55 ของมอร์ต้า CT ตามลำดับ เนื่องจากกำลังอัดของมอร์ต้าในช่วงอายุต้นมีผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดชันเป็นหลัก [24] ดังนั้นการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (แทนที่ร้อยละ 35, 50 และ 65 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในมอร์ต้าที่ใช้ใน



รูปที่ 4 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบมอร์ต้าควบคุมบ่มในน้ำประปา



รูปที่ 5 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบมอร์ต้าควบคุมบ่มในพรุ

การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุต้นของมอร์ต้าลดลงตามไปด้วย [25] ยกเว้นการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ซึ่งผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดเล็กลงหลังจากผ่านการบดละเอียดส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุต้นของมอร์ต้า [19] ทำให้มีค่ากำลังอัดที่เทียบเคียงมอร์ต้าควบคุม

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ต้า

ประเภทการบ่ม	อายุ (วัน)	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})				
		CT	PA25	PA35	PA50	PA65
น้ำประปา	7	362	364	313	264	200
	28	443	451	402	410	308
	60	470	482	443	414	320
	90	480	488	444	435	334
น้ำพรุ	7	327	354	301	221	130
	28	392	422	374	377	218
	60	405	428	398	347	245
	90	402	438	403	372	273

เมื่ออายุของมอร์ต้าเพิ่มขึ้นพบว่า การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยที่อายุ 28 วัน มอร์ต้า PA25 PA35 PA50 และ PA65 มีกำลังอัดเท่ากับ 451 402 410 และ 308 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 102 91 93 และ 70 ของมอร์ต้า CT ตามลำดับ และเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน มอร์ต้า PA25 PA35 PA50 และ PA65 มีกำลังอัดเท่ากับ 488 444 435 และ 334 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 102 93 91 และ 70 ของมอร์ต้า CT ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงอายุปลายของมอร์ต้า (อายุ 28 วันขึ้นไป) สามารถพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าให้ดีขึ้นได้ [19] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 วันขึ้นไป สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่ามอร์ต้า CT ได้

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากการบ่มในน้ำพรุที่มีต่อกำลังอัดของมอร์ต้า (แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 5) พบว่า การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ สามารถพัฒนากำลังอัด

ตารางที่ 5 สมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

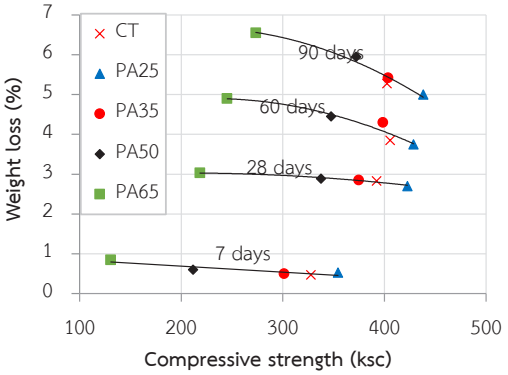
สมบัติทางเคมี	เถ้าปาล์มน้ำมัน				มอก. 2888 [23]	
	การศึกษานี้	Sata และคณะ [18]	Tangchirapat และคณะ [16]	Rattanashotinunt และคณะ [19]	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2
SiO_2	63.6	65.3	55.5	57.8		
Al_2O_3	1.6	2.6	9.2	4.6		
Fe_2O_3	3.8	2.0	5.6	3.3		
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	69.1	69.9	70.3	65.7	≥50.0	≥50.0
CaO	7.7	6.4	12.4	6.6	≤10.0	ไม่พิจารณา
MgO	6.5	3.1	4.6	4.2		
K_2O	8.6	5.7	0.0	8.3		
Na_2O	2.5	0.3	0.0	0.5		
SO_3	4.6	0.5	2.3	2.3	≤3.0	≤3.0
LOI	1.00	10.1	7.9	10.1	≤12.0	≤15.0

ให้มีค่าสูงกว่ามอร์ต้า CT ที่บ่มในน้ำพรุตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไป โดยมอร์ต้า PA25 ที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 354 422 428 และ 438 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 108 109 106 และ 109 ของมอร์ต้า CT ที่บ่มในน้ำพรุ ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussin และคณะ [13] พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของมอร์ต้าไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยพัฒนาค่ากำลังอัดให้สูงกว่ามอร์ต้าควบคุมเมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดได้ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นทำให้การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าเพิ่มขึ้น อีกทั้งช่วยลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกรด ส่งผลให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์เกลือแคลเซียมหรือยิปซัมที่สามารถละลายน้ำได้ ส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าที่ลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chatveera และ Lertwattanaruk [26] ที่พบว่า การใช้เถ้าแกลบดำเป็นวัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของมอร์ต้าไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยพัฒนาค่ากำลังอัดให้สูงกว่ามอร์ต้าควบคุมเมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดได้

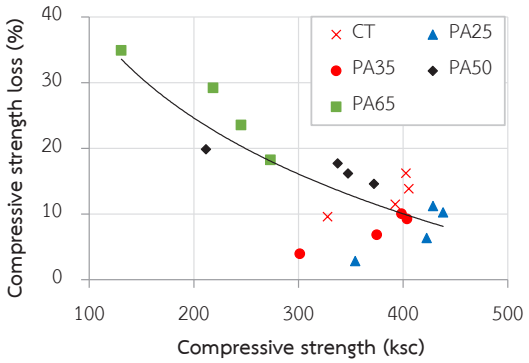
นอกจากนี้การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดทุกส่วนผสมมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่ออายุการบ่มในน้ำพรุของมอร์ต้าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจากการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมเกิดขึ้นได้ และยังสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าให้ดีขึ้นได้ ถึงแม้ว่ามอร์ต้าจะสัมผัสกับสภาพแวดล้อมพรุซึ่งมีความเป็นกรดตลอดเวลาก็ตาม

3.4 การสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

รูปที่ 6 แสดงค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าหลังจากที่บ่มในน้ำพรุพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ สามารถช่วยลดการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าได้ตั้งแต่อายุการบ่มที่ 7 วันเป็นต้นไป โดยการบ่มในน้ำพรุที่อายุ 90 วัน มีค่าการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้า PA25 และ PA35 เท่ากับร้อยละ 10.3 และ 9.2 ในขณะที่มอร์ต้า CT มีค่าการสูญเสียกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 16.2 จะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน (ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) สามารถช่วยลดผลกระทบจากกรดที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมพรุได้ เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์โดยการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถช่วยลดปริมาณการเกิด $Ca(OH)_2$ ที่จะไปทำปฏิกิริยากับกรด ส่งผลให้ลดการเกิดผลิตภัณฑ์เกลือแคลเซียมหรือยิปซัมที่จะส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้า [13]



รูปที่ 6 ร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าหลังจากที่บ่มในน้ำพรุ



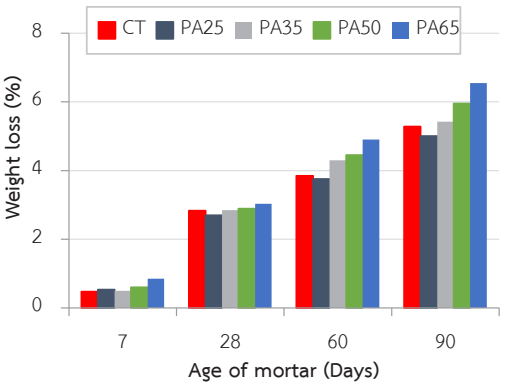
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในปริมาณที่สูงขึ้น (ร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) ส่งผลให้มอร์ต้ามีค่าการสูญเสียกำลังอัดที่สูงขึ้นในช่วงอายุต้น โดยการบ่มในน้ำพรุที่อายุ 7 วัน มอร์ต้า PA50 และ PA65 มีค่าการสูญเสียกำลังอัดของเท่ากับร้อยละ 19.8 และ 34.9 ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ต้า CT มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.6 เนื่องจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าในช่วงอายุต้น (ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก) เกิดขึ้นได้ช้า ทำให้มอร์ต้ามีความทึบน้ำหรือความหนาแน่นที่ต่ำ ไอออนกรดแทรกซึมจึงสามารถเข้าไปทำลายภายในเนื้อมอร์ต้าบางส่วน โดยไอออนกรดจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ในบริเวณผิวโดยรอบของมอร์ต้าที่ไอออนกรดแทรกซึมเข้าไปถึง ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในบริเวณดังกล่าวลดลง [13]

เมื่ออายุการบ่มของมอร์ต้าเพิ่มขึ้น ในส่วนบริเวณที่ไม่ได้รับความเสียหายจากกรดของมอร์ต้าจะมีการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานตลอดจนการลดลงของ $Ca(OH)_2$ (เนื่องจากถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน) ที่จะไปทำปฏิกิริยากับกรด ส่งผลให้การสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้า PA50 และ PA65 มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ต้า PA50 มีค่าการสูญเสียกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 14.68 ซึ่งต่ำกว่ามอร์ต้า CT ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 16.2

3.5 ผลของกำลังอัดที่มีต่อการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุพบว่า ผลกระทบจากกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดบริเวณพื้นที่พรุมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้มอร์ต้ามีค่ากำลังอัดที่ลดลงและการสูญเสียกำลังอัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดและเพิ่มความทนทานของมอร์ต้าที่เกิดจากกรดในสภาพแวดล้อมพรุได้ สังเกตได้ว่ามอร์ต้าที่ใช้และไม่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดในช่วงเดียวกัน (ประมาณ 400 กก/ซม^2) มอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าการสูญเสียกำลังอัดที่ต่ำกว่ามอร์ต้าที่ไม่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่เหมาะสม (แทนที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) นอกจากจะช่วยพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าให้สูงขึ้นยังจะสามารถช่วยเพิ่มความทนทานของมอร์ต้าที่สัมผัสสภาพแวดล้อมพรุให้ดีขึ้นได้เช่นกัน



รูปที่ 8 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าหลังจากที่บ่มในน้ำพรุ

3.6 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

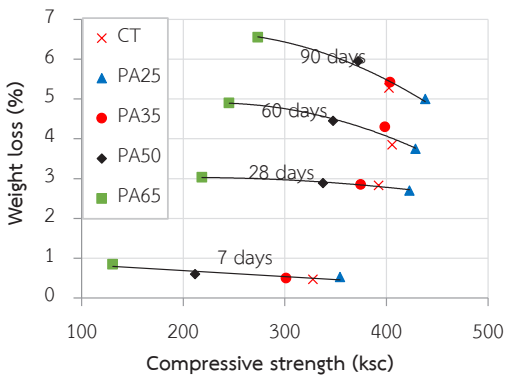
ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าหลังจากที่บ่มในน้ำพรุแสดงดังรูปที่ 8 พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้มอร์ต้ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอายุต้นที่สูงขึ้น โดยการบ่มในน้ำพรุที่อายุ 7 วัน มอร์ต้า PA25 PA35 PA50 และ PA65 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 0.53 0.50 0.60 และ 0.85 ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ต้า CT มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 0.47 เนื่องจากมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในปริมาณที่สูงจะมีค่ากำลังอัดที่ต่ำและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ไม่สมบูรณ์ในช่วงอายุเริ่มต้น [24] ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักสูงกว่ามอร์ต้า CT สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail และ Feng [12] ที่พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ที่แช่ในกรดเป็นเวลา 28 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม

เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้ามีค่าที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ซึ่งการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (จากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน) ที่จะไปทำปฏิกิริยากับกรดทำให้เกลือแคลเซียมที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าเกิดขึ้นลดลง [12] และการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเนื่องจากปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุปลายทำให้มอร์ต้ามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [13] สามารถช่วยลดค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่เกิดจากกรดในสภาพแวดล้อมพรุให้ต่ำกว่ามอร์ต้า CT ได้ โดยการบ่มในน้ำพรุที่อายุ 90 วัน มอร์ต้า PA25 PA35 PA50 และ PA65 เท่ากับร้อยละ 5.00 5.42 5.95 และ 6.55 ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ต้า CT มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5.28 ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณมากเกินไปตั้งแต่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ไม่ส่งผลดีต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้า

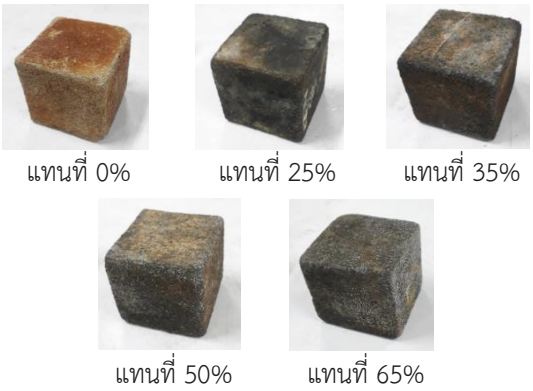
เมื่อพิจารณาผลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อการสูญเสียน้ำหนักจากงานวิจัยนี้พบว่า มอร์ต้าที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ลดลงต่ำกว่ามอร์ต้า CT ในทุกอายุการบ่ม ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด [12], [13] ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามคอนกรีตจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมารที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ๆ Sahoo และคณะ [27] ที่พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากการใช้เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่สัมผัสกับกรดซัลฟิวริกได้

3.7 ผลของกำลังอัดที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการ

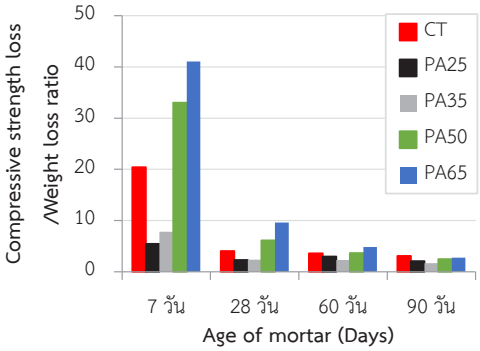


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ



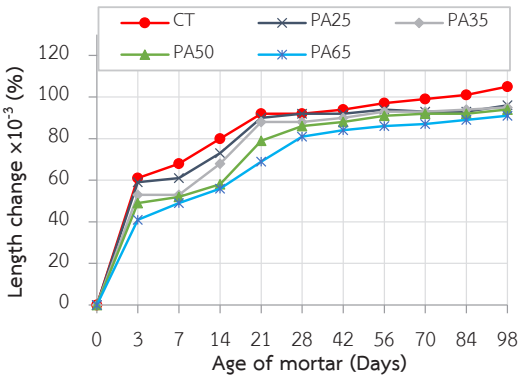
รูปที่ 10 ลักษณะทางกายภาพของมอร์ต้าในแต่ละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่บ่มในน้ำพรุเป็นเวลา 90 วัน

สูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ (แสดงดังรูปที่ 9) จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ต้าในแต่ละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันจะมีอิทธิพลน้อยมากในการช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ ในขณะที่ระยะเวลาในการบ่มในน้ำพรุที่นานขึ้นจะส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าในแต่ละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ตัวอย่างเช่น ที่อายุการบ่ม 7 วัน มอร์ต้า CT PA25 PA35 PA50 และ PA65 มีกำลังอัดเท่ากับ 327 354 301 211 และ 130 กก/ซม^2 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 0.47 0.53 0.50 0.60 และ 0.85 ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 402 438 403 372 และ 273 กก/ซม^2 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5.28 5.00 5.42 5.95 และ 6.55 ตามลำดับ เนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าเป็นผลมาจากความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณผิวภายนอกที่สัมผัสกับสภาพความเป็นกรดของน้ำพรุตลอดเวลา ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของเกลือแคลเซียมหรือยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ซึ่งละลายน้ำได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการหลุดร่อนของเนื้อมอร์ต้าในบริเวณดังกล่าว ยิ่งมีการสัมผัสน้ำพรุนานขึ้นความเสียหายในบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ต้าที่มีกำลังอัดต่ำจะมีความทึบน้ำหรือความหนาแน่นที่ต่ำ ทำให้ไอออนกรดแทรกซึมเข้าไปทำลายภายในเนื้อมอร์ต้าได้ง่ายกว่ามอร์ต้าที่มีกำลังอัดที่สูงกว่า การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าจึงเกิดขึ้นสูง ซึ่งลักษณะทางกายภาพของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุเป็นเวลา 90 วัน แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 11 อัตราส่วนระหว่างร้อยละการสูญเสียกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างร้อยละการสูญเสียกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ (แสดงดังรูปที่ 11) พบว่า ที่อายุ 7 วัน มอร์ต้า PA25 และ PA35 มีอัตราส่วนระหว่างร้อยละการสูญเสียกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 5.5 และ 7.8 ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ต้า CT PA50 และ PA65 มีอัตราส่วนระหว่างร้อยละการสูญเสียกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 20.4 33 และ 41.1 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้า PA25 และ PA35 ที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุที่อายุเริ่มต้นจะมีผลกระทบด้านการสูญเสียกำลังอัด



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

และการสูญเสียน้ำหนักที่สอดคล้องกัน ในขณะที่มอร์ต้า CT PA50 และ PA65 จะมีผลกระทบด้านการสูญเสียกำลังอัดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบด้านการสูญเสียน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาที่อายุ 90 วัน พบว่า มอร์ต้า CT PA25 PA35 PA50 และ PA65 มีอัตราส่วนระหว่างร้อยละการสูญเสียกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 3.1 2.1 1.7 2.5 และ 2.8 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าทุกส่วนผสมเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุที่อายุนานขึ้นจะมีผลกระทบด้านการสูญเสียกำลังอัดและด้านการสูญเสียน้ำหนักที่สอดคล้องกัน

3.8 การเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุ

ผลการทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าที่บ่มในน้ำพรุจะนำเสนอในรูปแบบความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงดังรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการขยายตัวของมอร์ต้าเมื่อบ่มในน้ำพรุที่มีสภาวะเป็นกรดได้ และการขยายตัวของมอร์ต้ามีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบพบว่า หลังการบ่มในน้ำพรุเป็นเวลา 90 วัน การขยายตัวของมอร์ต้า PA25 PA35 PA50 และ PA65 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.096 0.095 0.094 และ 0.091 หรือต่ำกว่าร้อยละ 8 9 10 และ 12 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้า CT ตามลำดับ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนซีเมนต์บางส่วนในมอร์ต้าทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ในสารประกอบซีเมนต์และจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตลดลงส่งผลให้ปริมาณเกลือแคลเซียมหรือยิปซัมเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง [28]

4. สรุป

จากผลการศึกษากำลังอัดและความทนทานของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดบริเวณพื้นที่พรุในพื้นที่ จังหวัดนราธิวาส แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดนอกจากจะสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าที่บ่มในสภาวะแวดล้อมปกติแล้ว ยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านความทนทานของมอร์ต้าที่สัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุปลายของมอร์ต้าสัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุให้สูงขึ้น ตลอดจนช่วยลดการสูญเสียกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการขยายตัวของมอร์ต้าให้ต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในพื้นที่พรุได้ นอกจากนี้สามารถช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของมอร์ต้าส่งผลให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตในบริเวณสภาพแวดล้อมที่เป็นพื้นที่พรุและสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด อีกทั้งเป็นการช่วยส่งเสริมให้มีการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ตลอดจนคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาส

ราชนครินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการ และนักศึกษาและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ในการเก็บข้อมูล ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] TCMA. (2021, September 20). Activity report 2020. TCMA. Bangkok, Thailand. [Online]. (in Thai). Available: https://drive.google.com/file/d/1za17MctUpGRNJmWgFLckrRaXAV0CFblZ/view

[2] L. K. Turner and F. G. Collins, "Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 125–130, 2013.

[3] OAE. (2021, September, 20). Palm oil product statistics year 2019. OAE. Bangkok, Thailand. [Online]. (in Thai). Available: https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/oilpalm%2062.pdf

[4] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Compressive strength and expansion of blended cement mortar containing palm oil fuel ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, no. 8, pp. 426-431, 2009.

[5] W. Tangchirapat, J. Tangpakasit, S. Waew-kum, and C. Jaturapitakkul, "A new pozzolanic material from palm oil fuel ash," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 26, no. 4, pp. 459–474, 2003 (in Thai).

[6] M. Safiuddin, M. Abdus Salam, and M. Z. Jumaat, "Utilization of palm oil fuel ash in concrete: a review," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 17, no. 2, pp. 234–247, 2011.

[7] L. Ponhsampatea, T. Cheewaket, and W. Chalee, "Chloride penetration and steel corrosion of concrete containing palm oil fuel ash under 5-year exposure in marine environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 23–36, 2018 (in Thai).

[8] R. Noraini, G. Seca, I. Johan, and I. J. Mohd, "Comparative study of water quality at different peat swamp forest of Batang Igan, Sibu Sarawak," *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 6, no. 5, pp. 416–421, 2010.

[9] Y. S. D. Satya, E. Saputra, and M. Olivia, "Performance of blended fly ash (FA) and palm oil fuel ash (POFA) geopolymer mortar in acidic peat environment," *Materials Science Forum*, vol. 841, pp. 83–89, 2016.

[10] M. Wijaya, M. Olivia, G. Wibisono, E. Saputra, and S. Wang, "Characteristics of geopolymer hybrid concrete in peat water," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 615, pp. 1–9, 2019.

[11] V. Sata, A. Sathonsaowaphak, and P. Chindaprasirt, "Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 5, pp. 700–708, 2012.

[12] M. A. Ismail and C. B. Feng, "The effect of acidic environment on the concrete utilizing palm oil fuel ash," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 495, pp. 1–12, 2019.

[13] M. W. Hussin, M. A. Ismail, A. Budiea, and K. Muthusamy, "Durability of high strength concrete containing palm oil fuel ash of

different fineness," *Malaysian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 180–194, 2009.

[14] *Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, ASTM Standards C1437, 2020.

[15] *Standard test method for fineness of hydraulic cement by the 45-μm (No. 325) Sieve*, ASTM Standards C430, 2017.

[16] *Standard test method for density of hydraulic cement*, ASTM Standards C188, 2017.

[17] *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50 mm] cube specimens)*, ASTM Standards C109M, 2021.

[18] *Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete*, ASTM Standards C490M, 2017.

[19] W. Tangchirapat, S. Khamklai, and C. Jaturapitakkul, "Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates," *Materials and Design*, vol. 41, pp. 150–157, 2012.

[20] W. Sanawung, T. Cheewaket, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Influence of palm oil fuel ash and W/B ratios on compressive strength, water permeability, and chloride resistance of concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, pp. 1–8, 2017.

[21] V. Sata, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 623–628, 2004.

[22] N. Makaratat, C. Rattanashotinunt, , W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and K. Manaputtananukul, "Properties of concrete made from industrial wastes containing calcium carbide residue palm oil fuel ash rice husk-bark ash and recycled aggregates," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 37–52, 2016 (in Thai).

[23] *Palm oil ash for use as an admixture in concrete*, Thai Industrial Standards Institute TIS 2888, 2018 (in Thai).

[24] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1145–1151, 2005.

[25] W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Influence of rice husk–bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 8, pp. 1812–1819, 2008.

[26] B. Chatveera and P. Lertwattanaruk, "Evaluation of nitric and acetic acid resistance of cement mortars containing high-volume black rice husk ash," *Journal of Environmental Management*, vol. 133, pp. 365–373, 2014.

[27] S. Sahoo, P. K. Parhi, and B. C. Panda, "Durability properties of concrete with silica fume and rice husk ash," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 1–10, 2021.

[28] K. Muthusamy, N. Zamri, I. Mohd Haniffa, N. N. Sarbini, and F. Mat Yahaya, "Acid resistance of oil palm shell lightweight aggregate concrete containing palm oil fuel ash," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 754–755, pp. 326–330, 2015.