วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

บทความวิจัย

ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

นภดล ศรภักดี[1] ชูเกียรติ ชูสกุล[1] สุพร ฤทธิภักดี[1] ประชุม คำพุฒ[2] มาหามะสูไฮมี มะแซ[3] เซาฟีร์ ดือราแม[4] และ ทวิช กล้าแท้ [1*]

[1] สาขาวิศวกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 ตุลาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 28 มกราคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 5 กุมภาพันธ์ 2569
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC) ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (30GPOFA, 40GPOFA และ 50GPOFA) โดยแช่น้ำทะเลหลังจากถอดแบบ 24 ชั่วโมง เพื่อให้สอดคล้องกับสภาะแวดล้อมทะเลจริง กำหนดปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 560 กก./ม.^{3} และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.28 ทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 60 วัน และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า คอนกรีต 30GPOFA สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 60 วัน เท่ากับ 459.61 กก./ซม.^{2} หรือร้อยละ 88 ของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ SRC เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (คอนกรีต CT-SRC) นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตที่ใช้ GPOFA แทนที่ SRC ไม่ส่งผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่น และสามารถช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 24-40 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT-SRC สามารถสรุปได้ว่า GPOFA มีศักยภาพในการเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีในสภาวะแวดล้อมทะเล อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนที่เหมาะสมไม่ควรเกินร้อยละ 30-40 เพื่อรักษาความแข็งแรง และส่งเสริมความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม; เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด; เศรษฐกิจหมุนเวียน; สภาวะแวดล้อมทะเล; สังคมคาร์บอนต่ำ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

บทความวิจัย

Effect of Sea Water on Compressive Strength and Elastic Modulus of Concrete Portland Cement Type V Containing Ground Palm Oil Fuel Ash

Napadon Sornpakdee[1], Chookiat Choosakul[1], Suporn Rittipuakdee[1], Prachoom Khamput[2], Mahamasuhaimi Masae[3], Saofee Dueramae[4] 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 Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

[4] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

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

Received: 8 October 2025; Revised: 28 January 2026; Accepted: 5 February 2026
Online Published: 20 April 2026

Abstract: This study investigates the effects of seawater exposure on the compressive strength and elastic modulus of concrete incorporating ground palm oil fuel ash (GPOFA) as a partial replacement for Type V Portland cement (SRC). GPOFA was used at 30%, 40%, and 50% by weight of binder. All specimens were cured in seawater 24 hours after demolding to simulate marine conditions. The binder content was fixed at 560 kg/m³ with a constant water-to-binder ratio of 0.28. Compressive strength was tested at 7, 28, and 60 days, and elastic modulus at 28 and 60 days. Results showed that 30% GPOFA replacement achieved 459.61 kg/cm² compressive strength at 60 days (approximately 88% of the control), with minimal impact on elastic modulus. Additionally, GPOFA use reduced CO_2 emissions by 24–40% compared to the control mix. GPOFA shows promise as a sustainable pozzolanic material for concrete in marine environments, with an optimal replacement level of 30–40% to balance performance and environmental benefits.

Keywords: Eco-Friendly concrete; Ground palm oil fuel ash; Circular Economy; Marine environment; Low carbon society

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

1. บทนำ

ประเทศไทยมีสภาพทางภูมิศาสตร์เป็นคาบสมุทร แบ่งทะเลออกเป็น 2 ฝั่ง คือฝั่งทะเลอ่าวไทย (Gulf of Thailand) ครอบคลุมพื้นที่ 17 จังหวัด มีความยาวชายฝั่งทั้งสิ้นประมาณ 2,055 กิโลเมตร และฝั่งทะเลอันดามัน (Andaman Sea) ครอบคลุมพื้นที่ 6 จังหวัด มีความยาวชายฝั่งประมาณ 1,093 กิโลเมตร รวมระยะทางตามแนวชายฝั่งทั้ง 2 ฝั่งประมาณ 3,148 กิโลเมตร มีท่าเรือที่ตั้งอยู่บนชายฝั่งจำนวนทั้งสิ้นประมาณ 449 ท่า ประกอบด้วยท่าเรือสินค้า 157 ท่า ท่าเรือประมง 235 ท่า และท่าเรือโดยสาร 57 ท่า [1] อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่ใช้วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุหลัก (Reinforced Concrete) ที่ตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลมักพบปัญหามากกว่าสิ่งปลูกสร้างทั่วไป เนื่องจากต้องเผชิญกับการกัดกร่อนจากไอเกลือ และสารเคมี เช่น คลอไรด์ หรือซัลเฟต ซึ่งสารประกอบเหล่านี้เป็นปัจจัยหลักที่เร่งปฏิกิริยาทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ส่งผลให้หน้าตัดเหล็กลดลงและเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีต การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจจะใช้วิธีเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริมให้มากขึ้น หรือ ใช้วัสดุปอซโซลานปรับปรุงคุณภาพของเนื้อคอนกรีตให้มีความทึบน้ำมากขึ้น โดยโครงสร้างดังกล่าวอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายสาเหตุ เช่น การกัดเซาะ การชะล้าง แม้โครงสร้างอยู่ห่างชายฝั่งหลายกิโลเมตรก็ยังจัดว่าเป็นโครงสร้างที่ต้องคำนึงถึงความต้านทานต่อน้ำทะเลเช่นกัน โดยคลอไรด์นั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ซึ่งในทางการป้องกันสามารถกระทำได้โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติกำลังอัดและมีความต้านทานการซึมของคลอไรด์ที่มากขึ้น การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตให้ได้คอนกรีตที่มีโครงสร้างภายในแน่นมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและมีความพรุนน้อยลง จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และเถ้าเปลือกไม้ เพื่อปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง สามารถทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chalee และคณะ [2] ซึ่งศึกษาการใช้เถ้าแกลบ–เปลือกไม้เป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทางทะเล โดยทดสอบภายใต้การสัมผัสจริงเป็นระยะเวลา 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ–เปลือกไม้มีการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมลดลง และมีสมรรถนะด้านความทนทานสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป เหมาะสำหรับงานโครงสร้างในสภาพแวดล้อมรุนแรง นอกจากนี้ Ho และคณะ [3] ซึ่งทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับความทนทานของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลาน ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ในสภาพแวดล้อมทางทะเล โดยพิจารณาผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ การกัดกร่อนของเหล็กเสริม และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพระยะยาว ผลการทบทวนสรุปว่า การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย และวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรม สามารถปรับปรุงโครงสร้างเนื้อคอนกรีตให้หนาแน่นขึ้น ลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทางทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังป้องกันการทำลายเนื่องจาก

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

สารละลายซัลเฟต และป้องกันการเสียหายที่ก่อให้เกิดกับเหล็กเสริมได้ ตลอดจนปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาต่อเนื่อง และลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ปรากฏมีการทดลองในต่างประเทศ และพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย เท่านั้น มากไปกว่านั้นทั้งหมดมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีการนำไปแช่น้ำทะเลหลังจากบ่มน้ำประปา 28 วัน [4-5] เมื่อพิจารณาวัสดุเหลือทิ้งข้างต้นพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุที่มีศักยภาพ ซึ่งส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม หากผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การบดละเอียด สามารถแสดงสมบัติปอซโซลาน และนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตได้ ช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน มักมุ่งเน้นการศึกษากำลังรับแรงอัดและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายใต้สภาวะบ่มปกติหรือการบ่มในน้ำจืด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC) ที่แช่น้ำทะเลหลังจากถอดแบบ 24 ชั่วโมง เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาะแวดล้อมทะเลจริง โดยใช้ GPOFAแทนที่ SRC เพื่อผลิตคอนกรีต ในอัตราร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (30GPOFA, 40GPOFA และ 50GPOFA) เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT-SRC) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ทดสอบกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง และลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์อย่างยั่งยืน การศึกษานี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยให้สอดคล้องกับนโยบายเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) และเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี 2593 (ค.ศ. 2050)

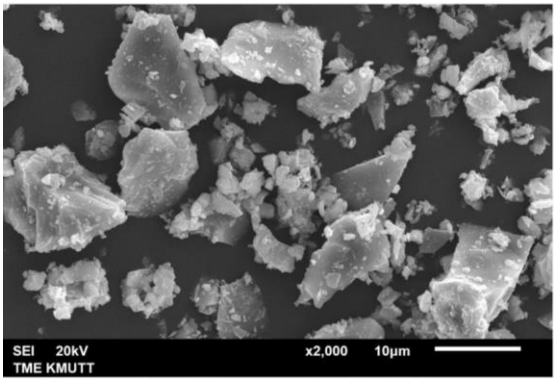
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Sulphate Resistance Portland Cement, SRC) ตามมาตรฐาน ASTM C 150 แสดงในรูปที่ 1 โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ SRC แสดงในตารางที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.17 สอดคล้องกับ มอก. 15-2562 ซึ่งระบุว่าความถ่วงจำเพาะของ SRC มีค่าระหว่าง 3.09 - 3.22 มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีค่าร้อยละ 66.7 และ 21.5 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า LOI ร้อยละ 1.7 โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม เนื้อละเอียด มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีอนุภาคเล็ก ๆ เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 20.4 ไมโครเมตร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

รูปที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC)



รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC) กำลังขยาย 2,000 เท่า

2. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้ทั่วไปในงานโครงสร้าง (Hydraulic Cement Type G, HLC) ตามมาตรฐาน ASTM C1157 แสดงในรูปที่ 3 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 สอดคล้องกับมาตรฐาน API Spec 10A ซึ่งระบุว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าระหว่าง 3.10 - 3.25 โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ HLC แสดงใน ตารางที่ 1 มีลักษณะ เป็นฝุ่นผง เนื้อละเอียด มีสีเทาเข้ม มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 57.4 และ LOI เท่ากับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภท G (HLC) ประเภทที่ 5 (SRC) และ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

Materials		SRC	HLC	GPOFA
Physical Properties	Specific gravity	3.17	3.14	2.62
	Median particle size, d_{50} (µm)	20.4	18.1	7.7
Chemical Composition (%)	SiO_2	21.5	26.5	57.6
	Al_2O_3	3.6	5.0	1.2
	Fe_2O_3	4.5	4.0	2.8
	CaO	66.7	57.4	9.6
	MgO	1.2	2.5	4.7
	K_2O	0.2	0.5	8.7
	Na_2O	0.1	0.0	0.1
	SO_3	2.1	2.8	2.2
	P_2O_5	-	-	5.5
	Cl	-	-	1.1
	LOI	1.7	1.4	6.5
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	-	61.6

1.4 โดยภาพถ่ายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของ HLC แสดงในรูปที่ 4 พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน มีเนื้อแน่น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 18.1 ไมโครเมตร

3. เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยนำไปทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่แห้งแล้วมาร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกเอาสิ่งเจือปนอื่นๆ ออก และนำมา

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

ผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบ (Los Angeles abrasion machine) โดยใช้ลูกเหล็กคละขนาดน้ำหนัก 50 กิโลกรัม เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [6] จะได้ GPOFA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร (รูปที่ 5) ซึ่งลักษณะทั่วไปของ GPOFA มีสีดำสนิท เนื้อเถ้ามีขนาดเล็กละเอียด (รูปที่ 6) มีองค์ประกอบทางเคมี 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 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] พบว่าจัดอยู่ในประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งมีผลรวมของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่มีค่า LOI เกินร้อยละ ตามมาตรฐาน ASTM C618 อยู่เล็กน้อย โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ GPOFA แสดงในตารางที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) และ GPOFA แสดงในรูปที่ 7 ตามลำดับ

4. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) เป็นทรายแม่น้ำที่ได้จากจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ค่าความถ่วงจำเพาะนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายเมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ โดยทั่วไปแล้วทรายที่มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.6 - 2.7 สำหรับการทดสอบค่าความละเอียด (Fineness Modulus) พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.79 และมีค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) เท่ากับร้อยละ 1.34 (ตารางที่ 2) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่ทรายสามารถดูดซับไว้ได้เมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัว ค่าที่ได้นี้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าทรายแม่น้ำที่นำมาทดสอบมีการดูดซึมน้ำน้อย ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีสำหรับวัสดุผสมคอนกรีต เนื่องจากจะช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสมคอนกรีตโดยรวม และส่งผลต่อความแข็งแรงและคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตที่ได้ ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายแม่น้ำที่ได้นี้ แสดงให้เห็นว่าทรายดังกล่าวมีค่าความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M

5. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) เป็นหินปูนย่อยที่ได้จากอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมวลรวมหยาบมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เท่ากับ 2.76 สำหรับการทดสอบค่าความละเอียด (Fineness Modulus) พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.31 นอกจากนี้ ยังได้มีการทดสอบ การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของหิน ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.91 (ตารางที่ 2) ค่าการดูดซึมน้ำนี้แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่หินสามารถดูดซับไว้ได้เมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัว

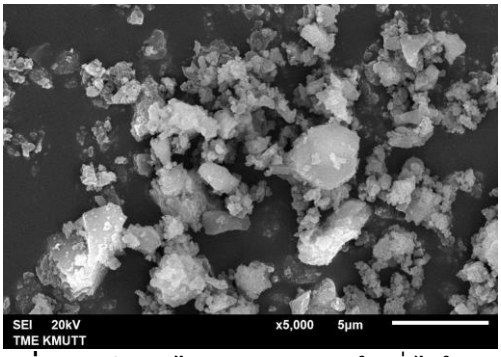
ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

Fine Aggregate	Specific Gravity	Finess Modulus (F.M.)	Water Absorption (%)	Unit weight (kg/m^3)
River Sand	2.60	3.09	0.96	1,670
Stone	2.76	7.31	0.91	1,450

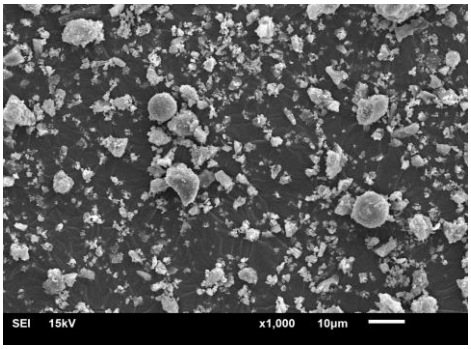
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

รูปที่ 3 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้ทั่วไปในงานโครงสร้าง (HLC)

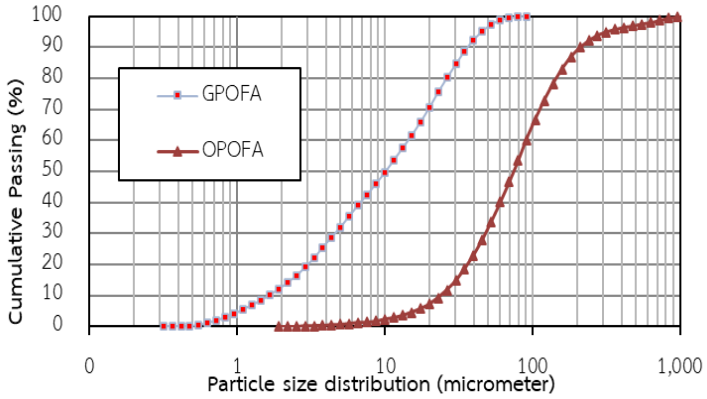
รูปที่ 5 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



รูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้ทั่วไปในงานโครงสร้าง (HLC) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 6 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

6. น้ำผสมคอนกรีต (Water) ใช้น้ำสะอาด ปราศจาก กรด ด่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

7. สารลดน้ำพิเศษประเภท F (High Range Water-Reducing Admixtures Type F, Super P) มาตรฐาน ASTM C 494

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

กำหนดปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 560 กก./ม.^{3} แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (30GPOFA 40GPOFA และ 50GPOFA) และเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT-SRC) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.28 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 100±20 มม. โดยปฏิภาคส่วนผสม และสัญลักษณ์ส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังจากถอดแบบคอนกรีตที่มีอายุครบ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณท่าเรือเก่าชายหาดแขวงเภา อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช ในสภาวะเปียกสลับแห้ง สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469 ที่อายุ 28 และ 60 วัน โดยค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้มาจากค่าเฉลี่ยของคอนกรีต 3 ตัวอย่าง

2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

1. การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 การทดสอบนี้มีความสำคัญในการกำหนดความสามารถในการทำงาน (Workability) หรือความข้นเหลวของคอนกรีตสด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการเท และตกแต่งคอนกรีต การยุบตัวที่เหมาะสมจะช่วยให้คอนกรีตสามารถเทลงแบบหล่อได้อย่างทั่วถึง และง่ายต่อการตกแต่ง

2. การบ่มตัวอย่างคอนกรีต เมื่อหล่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุครบ 24 ชม. จะนำคอนกรีตตัวอย่างไปแช่น้ำทะเลบริเวณท่าเรือขนอมเบทมารีน ซึ่งมีสภาวะเปียกสลับแห้ง ดังรูปที่ 8 เพื่อศึกษาผลกระทบจากน้ำทะเลที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

2.2.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว

1. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength Test of Concrete) ตามมาตรฐาน ASTM C39 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินความสามารถของคอนกรีตในการรับแรงอัด ซึ่งเป็น

รูปที่ 8 คอนกรีตตัวอย่างที่บ่มในสภาวะเปียกสลับแห้ง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต โดยจะทำการทดสอบที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ของอายุคอนกรีต โดยจะทดสอบครั้งละ 3 ตัวอย่าง

2. การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of Elasticity) ตามมาตรฐาน ASTM C469 โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญของคอนกรีต ซึ่งแสดงถึงความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงกระทำโดยไม่เกิดการเสียรูปถาวร การวิเคราะห์โมดูลัสยืดหยุ่นช่วยให้สามารถคาดการณ์พฤติกรรมการรับน้ำหนัก และการเสียรูปของโครงสร้างคอนกรีต โดยจะทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 60 วัน ของอายุคอนกรีต โดยจะทดสอบครั้งละ 3 ตัวอย่าง

2.2.3 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต

ตารางที่ 4 แสดงค่า Emission factor ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย จัดทำโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2) คำนวณได้จากผลคูณระหว่างปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต กับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor) ดังสมการที่ 1

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

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัว และปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีต และปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Super P) ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต CT-SRC มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 101 มม. ซึ่งอยู่ในช่วงเป้าหมายของการออกแบบที่ 100±20 มม. และมีการใช้ Super P ในปริมาณต่ำเท่ากับร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต CT-SRC มีความสามารถในการไหลตัวที่ดีในระดับหนึ่ง โดยไม่ต้องพึ่งพา Super P ในปริมาณมากนัก ในขณะที่คอนกรีต HLC มีค่าการยุบตัวที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 86 มม. ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ค่อนข้างต่ำกว่าค่าเป้าหมาย และมีการใช้ Super P ในปริมาณที่

ตารางที่ 3 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

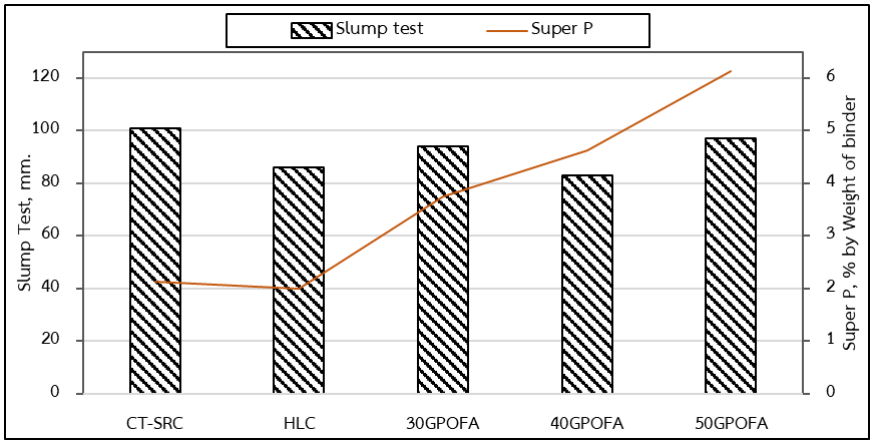
MIX	Mix Proportion (kg./m.^{3})						W/B	Super P	Slump (mm.)
	HLC	SRC	GPOFA	Sand	Stone	Water			
CT-SRC	-	560	-	764	986	156.8	0.28	2.1	101
HLC	560	-	-	764	986	156.8	0.28	2.0	86
30GPOFA	-	392	168	751	970	156.8	0.28	3.5	95
40GPOFA	-	336	224	747	964	156.8	0.28	4.2	83
50GPOFA	-	280	280	742	960	156.8	0.28	6.1	98

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor)

Materials	Emission factor/kg
HLC	0.847 [6]
SRC	0.910 [6]
GPOFA	0.106 [9]
River sand	0.028 [10]
Stone	0.039 [10]
Water	0.0003238 [10]
Super P	0.772 [10]

ใกล้เคียงกับคอนกรีต CT-SRC ซึ่งอาจบ่งชี้ได้ว่าส่วนผสมของ คอนกรีต HLC อาจมีความต้องการน้ำที่สูงกว่า หรือมีลักษณะของวัสดุที่ทำให้คอนกรีตมีความหนืดมากกว่า สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ GPOFA ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า คอนกรีต 30GPOFA มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 95 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย และมีการใช้ Super P เท่ากับร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ GPOFA เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (40GPOFA) พบว่าค่าการยุบตัวลดลงเท่ากับ 83 มม. ซึ่งต่ำกว่าค่าเป้าหมายอย่างชัดเจน แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณ Super P ขึ้นเป็นร้อยละ 4.2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานก็ตาม การลดลงของค่าการยุบตัวนี้อาจเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของ GPOFA ที่มีความต้องการน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ GPOFA สูงสุดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (50GPOFA) กลับพบว่าค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 98 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายอีกครั้ง ในขณะที่มีการใช้ Super P ในปริมาณสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 6.1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากผลการทดสอบในแต่ละส่วนผสมแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของอัตราส่วนผสมคอนกรีต ปริมาณ Super P และความสามารถในการไหลตัว หรือความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการทำงานคอนกรีต [6, 11-12]



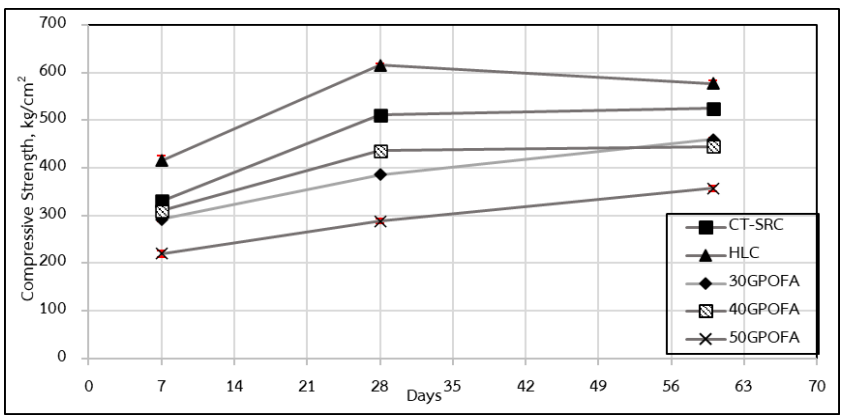
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีต และปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

จากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าชนิดของส่วนผสมในคอนกรีตมีผลอย่างมากต่อค่าการยุบตัวและความต้องการ Super P โดยคอนกรีต HLC และคอนกรีต CT-SRC มีความสามารถในการไหลตัวที่ดีโดยธรรมชาติ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ GPOFA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความต้องการปริมาณ Super P ในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวที่เหมาะสม นอกจากนี้ ปริมาณการใช้ GPOFA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความต้องการ Super P ในปริมาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอนกรีต 50GPOFA ซึ่งต้องการสารลดน้ำพิเศษที่สูงที่สุดเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกับคอนกรีต CT-SRC เนื่องจาก GPOFA มีขนาดอนุภาคที่เล็ก และมีความเป็นรูพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ส่งผลให้มีความต้องการน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการเทได้ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ทำให้มีการดูดซับน้ำมากขึ้นในระหว่างการผสมคอนกรีตซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเทพฤทธิ์ เจริญสุข ที่ศึกษาผลของปริมาณการใช้ Super P ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในปริมาณสูงในคอนกรีตกำลังสูง [12]

3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่าคอนกรีตควบคุม (CT-SRC) มีกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 7 28 และ 60 วัน เท่ากับ 330.75 511.16 และ 524.98 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ซึ่งถูกปรับให้เป็นค่าร้อยละ 100 ในทุกช่วงอายุ แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการกำลังอัดของคอนกรีตทั่วไป โดยมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างต่อเนื่องในช่วงแรก และอัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่ออายุมากขึ้น ในขณะที่คอนกรีต HLC แสดงค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต CT-SRC อย่างชัดเจนในทุกช่วงอายุ โดยคอนกรีต HLC โดยมีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน สูงถึง 415.13 กก./ซม.^{2} หรือร้อยละ 126 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT-SRC และยังคงมีกำลังอัดสูงกว่าที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 615.15 กก./ซม.^{2} หรือร้อยละ 120 ของคอนกรีต CT-SRC จากนั้นเมื่อระยะเวลาการบ่มครบ 60 วันมีค่ากำลังอัด 577.15 กก./ซม.^{2} หรือ



รูปที่ 10 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุ 7, 28 และ 60 วัน

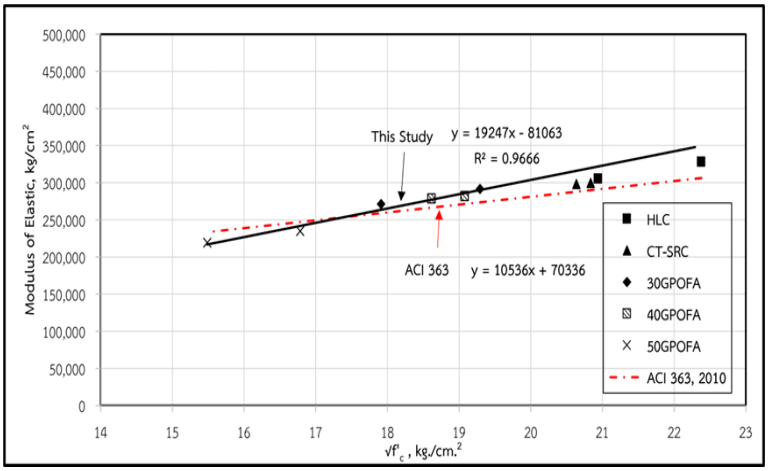
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

ร้อยละ 110 ของคอนกรีต CT-SRC ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของคอนกรีต HLCมีสัดส่วนของวัสดุ หรือชนิดของซีเมนต์ที่ส่งเสริมให้เกิดการพัฒนากำลังอัดที่รวดเร็ว และสูงกว่าคอนกรีต CT-SRC ในสภาวะแวดล้อมทะเล [2, 13-14] อย่างไรก็ตามอัตราส่วนกำลังอัดสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบของสภาวะน้ำทะเล เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มี GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แสดงแนวโน้มของกำลังอัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมในทุกช่วงอายุ และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้ GPOFA ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยคอนกรีต 30GPOFA มีกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 60 วัน เท่ากับ 292.03 385.56 และ 459.61 กก./ซม^2 หรือร้อยละ 88 75 และ 88 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดสัมพัทธ์ค่อนข้างต่ำในช่วงต้น แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่มักพบในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของ GPOFA จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว โดยคอนกรีต 40GPOFA แสดงกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต 30GPOFA ในช่วงอายุ 7 และ 28 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 309.29 และ 435.51 กก./ซม.^{2} หรือร้อยละ 94 และ 85 ของคอนกรีต CT-SRC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต 50GPOFA ซึ่งมีกำลังอัดต่ำที่สุดในกลุ่มคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ GPOFA โดยมีค่ากำลังอัดเพียง 219.99 287.90 และ 356.95 กก./ซม.^{2} หรือร้อยละ 67 56 และ 68 ของคอนกรีต CT-SRC ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของวิเชียร ชาลี ที่ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งระบุว่าการใช้ GPOFA ในปริมาณที่มากอาจส่งผลต่อการพัฒนากำลังในช่วงต้น [13-14] อย่างไรก็ตามที่อายุ 60 วัน จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดสัมพัทธ์ร้อยละ 119 99 และ 124 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ซึ่งบ่งชี้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเริ่มทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ในช่วงอายุที่มากขึ้นทำให้กำลังอัดพัฒนาขึ้นได้ซึ่งแตกต่างกับคอนกรีต HLC ที่มีกำลังอัดสัมพัทธ์ที่ 60 วัน เท่ากับร้อยละ 94 เมื่อเทียบกับอายุ 28 วัน ดังรูปที่ 9 ซึ่งบ่งชี้ว่าการบ่มคอนกรีตในสภาวะน้ำทะเล ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังอัดลดลง [13-16]

3.3 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของรากที่สองของกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 60 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุประสานที่แตกต่างกัน มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน และมีความสัมพันธ์กับรากที่สองของกำลังอัดคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นตามอายุการบ่มคอนกรีต CT-SRC ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 298,181 กก./ซม.^{2} ควบคู่กับรากที่สองกำลังอัดเท่ากับ 20.64 กก./ซม.^{2} เมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 60 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 299,756 กก./ซม.^{2} พร้อมกับรากที่สองกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 20.83 กก./ซม.^{2} แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต CT-SRC มีการพัฒนาของกำลังอัดส่งผลให้ค่าความ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของรากที่สองของกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาคอนกรีต HLC ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดในกลุ่มเท่ากับ 327,926 กก./ซม.^{2} และมีรากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 22.38 กก./ซม.^{2} อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุถึง 60 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเล็กน้อยเท่ากับ 305,277 กก./ซม.^{2} ในขณะที่รากที่สองของกำลังอัดลดลงเท่ากับ 20.94 กก./ซม.^{2} การเปลี่ยนแปลงนี้อาจบ่งชี้ถึงปัจจัยภายในคอนกรีตที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความโมดูลัสยืดหยุ่น และรากที่สองของกำลังอัดในระยะยาว โดยคอนกรีต 30GPOFA ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 271,342 กก./ซม.^{2} (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 17.91 กก./ซม.^{2}) และเพิ่มขึ้นเป็น 291,371 กก./ซม.^{2} (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 19.29 กก./ซม.^{2}) ที่อายุ 60 วัน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่คอนกรีต 40GPOFA มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 278,201 กก./ซม.^{2} (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 18.62 กก./ซม.^{2}) ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 281,641 กก./ซม.^{2} (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 19.08 กก./ซม.^{2}) ที่อายุ 60 วัน การเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากนักนี้อาจบ่งชี้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วงนี้มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นไม่มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาคอนกรีต 50GPOFA มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุดในกลุ่มเท่ากับ 219,145 กก./ซม.^{2} (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 15.49 กก./ซม.^{2}) ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเท่ากับ 234,619 กก./ซม.^{2} (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 16.78 กก./ซม.^{2}) ที่อายุ 60 วัน แม้ว่าค่าจะยังต่ำที่สุด แต่การเพิ่มขึ้นของทั้งโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของคอนกรีตเมื่ออายุมากขึ้น [6, 11, 12]

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ สามารถช่วยลดผลต่อกระทบต่อกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในสภาวะน้ำทะเล ยกเว้นคอนกรีตที่ใช้ปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ เนื่องจากกำลังอัด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

และโมดูลัสยืนหยุ่นมีค่าลดลง หลังจากอายุบ่มในสภาวะน้ำทะเล 60 วัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากผลกระทบที่เกิดจากน้ำทะเลที่มีผลต่อการใช้ปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ โดยคอนกรีต HLC แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดที่อายุ 28 วัน แต่กลับมีค่าลดลง เมื่ออายุถึง 60 วัน ในขณะที่กำลังอัดประลัยลดลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาคอนกรีต CT-SRC แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของทั้งโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังอัดประลัยเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

ในส่วนของคอนกรีตที่มี GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังอัดประลัยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม อย่างไรก็ตามผลการทดสอบมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ GPOFA การที่โมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มเป็นผลมาจากกระบวนการไฮเดรชันของซีเมนต์ที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่น และแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการรับแรงภายใต้แรงกระทำสูงขึ้น

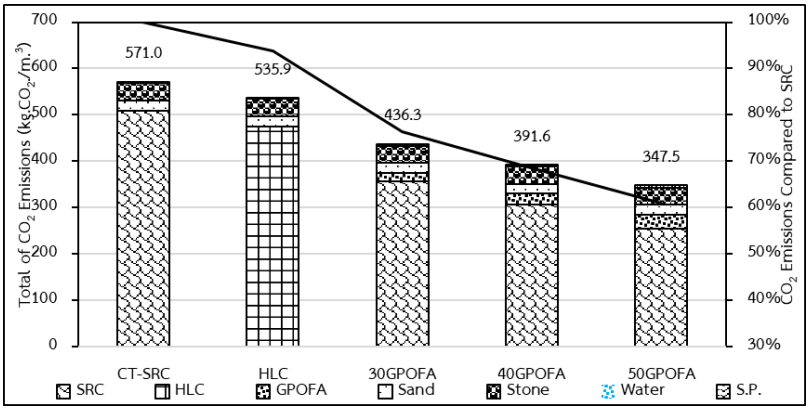
อย่างไรก็ตาม กรณีของคอนกรีต HLC ที่โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงที่อายุ 60 วัน ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงผลกระทบจากสภาวะน้ำทะเล โดยกรณีของคอนกรีต HLC ไม่เหมาะสำหรับใช้ในสภาวะน้ำทะเล ที่มีซัลเฟตและคลอไรด์สูง แสดงว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการต้านทานซัลเฟต และคลอไรด์สูงกว่าปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ ทั้งยังช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะยาว การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นแตกต่างกันไปตามปริมาณที่ใช้

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบจากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต 40GPOFA มีแนวโน้มให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดเมื่ออายุ 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นที่ใช้ GPOFA ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจบ่งชี้ว่าการใช้ GPOFA ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามการใช้ GPOFA ในปริมาณที่สูง อาจส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณซีเมนต์ที่ลดลง และผลกระทบต่อการก่อตัวของโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ ซึ่งส่งผลต่อกลไกการพัฒนาความแข็งแรง และความยืดหยุ่นในระยะยาว [11-14]

3.4 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต

รูปที่ 12 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 (CT-SRC) และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ต่อปริมาตร 1 ม.^{3} โดยปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลกรัมวัสดุ (kg.CO_2/kg) จากกระบวนการผลิต การขนส่ง และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อื่น ๆ รวมเท่ากับ 0.847 kg.CO_2/kg. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ประมาณ 0.910 kg.CO_2/kg. [8]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004



รูปที่ 12 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีต

ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้พลังงานในการบด และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อื่น ๆ รวมเท่ากับ 0.106 kg.CO_2/kg. [9] มวลรวมละเอียด (ทรายหยาบ) เท่ากับ 0.028 kg.CO_2/kg. มวลรวมหยาบ (หิน3/4) เท่ากับ 0.039 kg.CO_2/kg. สารลดน้ำพิเศษประเภท F (Super P) ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตเท่ากับ 0.772 kg.CO_2/kg. และน้ำสะอาด ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.0003238 kg.CO_2/kg. [10]

ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าคอนกรีต HLC และคอนกรีต CT-SRC มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 535.9 และ 571.0 kg.CO_2/m.^{3} ตามลำดับ เนื่องจากทั้งสองส่วนผสมนี้ใช้วัสดุประสานหลักในปริมาณที่เท่ากัน (560 กก./ม.^{3}) และมีค่าการปล่อย CO_2 ต่อหน่วยการผลิตที่ใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณการปล่อย CO_2 ใกล้เคียงกัน บ่งชี้ถึงสัดส่วนการปล่อยที่คล้ายคลึงกันจากวัสดุประสานหลักเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ในคอนกรีต เช่น ทราย หิน และน้ำ ซึ่งมีปริมาณการปล่อย CO_2 ต่อหน่วยที่ต่ำกว่ามาก เมื่อพิจารณาถึงค่าการปล่อย CO_2 ต่อหน่วยการผลิตของวัสดุต่างๆ พบว่า HLC และ SRC มีค่าการปล่อย CO_2 ต่อหน่วยการผลิตที่สูงมาก (0.847 และ 0.910 kg.CO_2/kg.) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมที่สูง ในทางตรงกันข้าม GPOFA มีค่าการปล่อย CO_2 ต่อหน่วยการผลิตที่ต่ำกว่ามาก (0.106 kg.CO_2/kg.) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การนำ GPOFA มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับวัสดุผสมอื่นๆ เช่น ทราย หิน น้ำ และ Super P มีค่าการปล่อย CO_2 ต่อหน่วยการผลิตที่ต่ำมาก (0.028, 0.039, 0.0003238 และ 0.772 kg.CO_2/kg. ตามลำดับ) และถึงแม้จะใช้ในปริมาณมากในส่วนผสมคอนกรีต แต่มีสัดส่วนในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุประสาน โดยสามารถกล่าวได้ว่า การนำ GPOFA มาใช้เป็นส่วนผสมทดแทน SRC ในการผลิตคอนกรีต เป็นแนวทางที่มี

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

ประสิทธิภาพในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจน โดยอัตราส่วนการทดแทนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการปล่อย CO_2 รวมของคอนกรีตลดลงมากขึ้น โดยรวมพบว่าการใช้ GPOFA แทนที่ SRC ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตคอนกรีตลงได้ร้อยละ 24 31 และ 39 ตามลำดับ [9-11]

4. สรุปผลการวิจัย

1. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT-SRC) ให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน แต่กำลังอัดของคอนกรีต HLC ลดลงเมื่อบ่มในน้ำทะเลนานขึ้น เนื่องจากผลกระทบจากซัลเฟตและคลอไรด์

2. การใช้ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ SRC ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ โดยคอนกรีต 30GPOFA ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีต CT-SRC ในระยะยาว เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของ HLC และ SRC แต่มีการพัฒนากำลังในระยะยาวที่สูงกว่า และสามารถช่วยลดผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะน้ำทะเล

3. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม GPOFA พัฒนาขึ้นตามอายุการบ่ม โดยคอนกรีต 40GPOFA มีค่าสูงสุด ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ใช้ GPOFA แทนที่ SRC มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับมาตรฐาน ACI 363 ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้ GPOFA สามารถให้คุณสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ HLC และ SRC การใช้ GPOFA ไม่ส่งผลเสียต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

4. การใช้ GPOFA แทนที่ SRC ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถช่วยลดปริมาณการปล่อย CO_2 จากการผลิตคอนกรีตสู่ชั้นบรรยากาศลดลงร้อยละ 22, 29, และ 37 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่เดียวกัน เนื่องจากกระบวนการผลิต GPOFA ปล่อยคาร์บอนน้อยกว่า HLC และ SRC ทั้งยังช่วยลดมลภาวะที่เกิดจากการกองเก็บ และทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณมาก

5. การใช้ GPOFA แทนที่ SRC ในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อรักษากำลังอัดของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล สำหรับงานที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูง หรืองานที่ต้องการรับกำลังอัดในระยะยาว อาจพิจารณาใช้ GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ GPOFA มีการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวที่ดีกว่า ทั้งยังสามารถลดผลกระทบจากสภาวะน้ำทะเลที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีว่า เพื่อลดต้นทุนและปริมาณการปล่อยคาร์บอน

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า GPOFA มีศักยภาพในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล โดยไม่เพียงช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ดี การใช้ GPOFA ควรอยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม (ไม่เกินร้อยละ 30) เพื่อรักษาสมดุลระหว่างกำลังอัดและความคุ้มค่าของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางสำคัญสำหรับการพัฒนา

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

คอนกรีตอย่างยั่งยืน โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์สูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน)คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] http://www.cuti.chula.ac.th/articles/482/. (Accessed on 24 February 2025) (in Thai)

[2] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul, Utilization of rice husk–bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment, Cement and Concrete Composites, 2013, 37, 47–53.

[3] L.S. Ho, H.T.T. Ngo, H.T. Vu, S.T. Nguyen, V.N. Chau and V.Q. Dang, Durability of mortar and concrete containing pozzolans as a partial cement replacement in the marine environment: a review, Journal of Science and Transport Technology, 2023, 3, 13–25.

[4] N. Yokawat and A. Rattanadilok Na Phuket, Chloride binding and chloride penetration of fly ash concrete under 15-year exposure in marine environment, Thesis, Burapha University, Thailand. 2013 (in Thai)

[5] https://thaitca.or.th/wp-content/uploads/2022/09/TCA_M-020206_Marine-concrete.pdf. (Accessed on 4 February 2025) (in Thai)

[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] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2017.

[8] https://www.thaicma.or.th/upfiles/Environmentally/Environmentally%20Friendly%20Cement%20Products/TCMA-Handbook-HydraulicCement%20w-coverV.21-R.1-As-of-Dec-2-2022.pdf. (Accessed on 14 February 2025) (in Thai)

[9] N. Sornpakdee, T. Klathae, C. Choosakul, S. Rittipuakdee, 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)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.004

[10] P. Chindaprasirt, W. Kroehong, N. Damrongwiriyanupap, 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] 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.

[12] T. Charoensuk, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, High-strength concrete containing high volume ground palm oil fuel ash. The 25th National Convention on Civil Engineering (NCCE25), Proceeding, 2020, STR44-1– STR44-6. (in Thai)

[13] W. Chalee, A. Jaiyong, T. Cheewaket and C. Jaturapitakkul, An empirical model to predict chloride penetrations in concrete containing palm oil fuel ash based on 10-year exposure under marine environment, International Journal of Concrete Structures and Materials, 2023, 17(1), 53.

[14] W. Chalee, T. Cheewaket and C. Jaturapitakkul, Enhanced durability of concrete with palm oil fuel ash in a marine environment, Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13, 128-137.

[15] H.M. Hamada, G.A. Jokhio, F.M. Yahaya, A.M. Humada and Y. Gul, The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. Construction and Building Material, 2018, 175, 26–40.

[16] T.U. Mohammed, H. Hamada and T. Yamaji, Marine durability of 30-year old concrete made with different cements. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(1), 63–75.