วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม – กุมภาพันธ์ 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 1 January – February 2026

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาเถ้าลูกสนทะเลเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์

ณปภัช คงฤทธิ์[1,*], จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์[1] และ พลสรรค์ แซ่เตียว[1]

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเลียม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: napaphat.s@rmutsv.ac.th โทรศัพท์: 086-9553213
(รับบทความ: 4 กันยายน 2568; แก้ไขบทความ: 18 ธันวาคม 2568; ตอบรับบทความ: 5 มกราคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนทะเล เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในปูนซีเมนต์ เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลูกสนทะเลเป็นวัสดุประสาน หาระยะเวลาที่ในการบ่มที่เหมาะสมที่สุดของมอร์ตาร์ และเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ โดยทำบล็อกซีเมนต์ขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้อัตราส่วนเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 ทดสอบตัวอย่างละ 4 ครั้ง พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 10 ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล การเพิ่มปริมาณเถ้าลูกสนและระยะการบ่มมากขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัด

คำสำคัญ: ปอซโซลาน เถ้าลูกสนทะเล มอร์ตาร์ กำลังอัด

การอ้างอิงบทความ: ณปภัช คงฤทธิ์, จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์ และ พลสรรค์ แซ่เตียว, "การพัฒนาเถ้าลูกสนทะเลเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์," *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 75-86, 2569.

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม – กุมภาพันธ์ 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 1 January – February 2026

บทความวิจัย (Research Article)

Development of Sheoaks Ash as a Replacement of Portland Cement

Napaphat Kongrit[1,*], Jakkrapong Jitjamnong[1] and Phonsan Saetiao[1]

[1] Department of Petroleum Technology, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

*Corresponding Author: napaphat.s@rmutsv.ac.th, Tel: 086-9553213
(Received: September 4, 2025; Revised: December 18, 2025; Accepted: January 5, 2026)

Abstract

The objective of this research was to study the chemical composition of the sheoaks ash to be used as a pozzolan material in cement. The Compressive strength of the mortar is compared to sheoaks ash as a pozzolan material. Study the most appropriate cured time for mortar and compare the mortar density. This research used 125 cubic centimeter cement blocks. Use the sheoaks ash to replace cement was 0, 10, 10, 20 and 30 percent, cured in water for 7, 14, 21 and 28 days. Use ASTM C109 compressive strength, test each sample 4 times. It was found that the mortar used sheoaks ash replacing cement at 10 percent and curing time at 14 days had the compressive strength of 11.72 MPa. Increasing the amount of sheoaks ash and the curing period were the factors affecting the average compressive strength.

Keywords: Pozzolan, Sheoaks Ash, Mortar, Compressive Strength

Please cite this article as: N. Kongrit, J. Jitjamnong and P. Saetiao, "Development of Sheoaks Ash as a Replacement of Portland Cement," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 75-86, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในโครงการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมเมื่อหลุมผลิตปิโตรเลียมหมดศักยภาพ ไม่มีความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์หรือพื้นที่ที่ได้รับสัมปทานหมดระยะเวลากับทางภาครัฐแล้ว ผู้ประกอบการปิโตรเลียมจะต้องดำเนินการรื้อถอนสิ่งติดตั้งในกิจการปิโตรเลียมออกจากพื้นที่ตามที่กฎหมายกำหนดไว้ เพื่อความปลอดภัยในการทำกิจกรรมต่าง ๆ และการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ต่อไป โดยจะดำเนินการใน 3 ส่วน คือ 1) การปิดและการสละหลุมถาวร (Plug and Abandonment) 2) การรื้อถอนโครงสร้างแท่นปิโตรเลียม และ 3) การรื้อถอนท่อขนส่งปิโตรเลียมใต้ทะเล การปิดและการสละหลุมถาวร จะใช้วิธีการอัดซีเมนต์ลงไปในท่อกรุที่ขุดลึกลงไปจนถึงชั้นหินกักเก็บปิโตรเลียม เพื่อปิดหลุมผลิตอย่างถาวร ซึ่งเมื่อซีเมนต์แข็งตัวแล้วจะต้องทำการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีปิโตรเลียมรั่วไหลออกมาได้อีก

ซีเมนต์ หรือ ปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นวัสดุผสานสำหรับผลิตคอนกรีต มีส่วนผสมหลักคือ หินปูนและดินเหนียว และมีผสมอื่น เช่น ซิลิกา อะลูมินา สินแร่เหล็ก ยิปซั่ม และสารเพิ่มพิเศษชนิดอื่น ๆ ซีเมนต์ตามความหมายของการใช้งานทางวิศวกรรมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ บิทูมินัส (Bituminous) และนอนบิทูมินัส (Nonbituminous) บิทูมินัสซีเมนต์ได้แก่ มะตอย (Asphalts) และ น้ำมันยาง (Tars) และนอนบิทูมินัสซีเมนต์ ได้แก่ อะลูมินาซีเมนต์ (Alumina Cement) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) มีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อนต้องผสมน้ำในปริมาณที่เหมาะสม แล้วทิ้งไว้ให้แห้งจึงจะแข็งตัว ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างมากที่สุดนับเป็นวัสดุหลักในการผลิตคอนกรีต ปูนมอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่าง ๆ มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่น ๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน (Pozzolan) และสารลดน้ำ เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและมีงานวิจัยต่าง ๆ มากมายเพื่อพัฒนาคุณภาพซีเมนต์ มีการค้นคว้าวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในซีเมนต์ได้ เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบขาว เถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา วัสดุรีไซเคิล และกากตะกรันตะกั่ว ซึ่งการนำวัสดุเหลือใช้มาพัฒนาคุณสมบัติบางประการให้ดีขึ้นแล้วยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต

จากข้อมูลข้างต้นทางกลุ่มมีความสนใจในการศึกษาเถ้าของลูกสนเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งในพื้นที่จังหวัดสงขลาสามารถพบพืชสนได้ตามชายฝั่งทะเลทั่วไปและไม่ได้มีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใด โดยทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าของลูกสน ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมกับซีเมนต์และดิน เพื่อลดต้นทุนการผลิตของซีเมนต์ที่ใช้ในงานปิโตรเลียมและเกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

2. ทบทวนวรรณกรรม

ชิณวิชญ์ วัชรชิณณ์ และปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์ (2561) ได้ทำการศึกษานำเถ้าชีวมวลไม้ยางพาราที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าชีวมวลกับผักตบชวา ส่วนผสมคอนกรีตตั้งต้นคือ ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน ในอัตรา 1 : 2 : 4 โดยการทดลองลดปริมาณปูนซีเมนต์และหิน ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้เถ้าชีวมวลไม้ยางพาราทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 และใช้เส้นใยผักตบชวาทดแทนหินที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน ในสัดส่วนร้อยละ 0.5, 1 และ 2 ผลจากการทดสอบพบว่า เถ้าชีวมวลไม้ยางพารา ในอัตราร้อยละ 15 และ เส้นใยผักตบชวาร้อยละ 0.5 เป็นส่วนผสมที่แข็งแรงที่สุด มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 10.27 เมกะปาสคาล ที่ระยะบ่ม 28 วัน [1]

ปิยนุช ม่วงทอง และคณะ (2557) ทำการศึกษาอิทธิพลของวัสดุปอซโซลาน ประเภทวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย ที่มีผลต่อ

สมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก นำมาผสมและขึ้นรูปเป็นอิฐดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่าเถ้าแกลบช่วยเพิ่มความต้านทานกำลังอัดให้แก่อิฐดินซีเมนต์ ได้ดีกว่าเถ้าชานอ้อย โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมและให้ค่าความต้านทานกำลังอัดสูงสุด คือ อิฐดินซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก [2]

จรรยพร หลู่จิ่ง และคณะ (2566) ทำการศึกษาการเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของปูนซีเมนต์ของอิฐที่มีส่วนผสมของเถ้าไม้ยางพาราด้วยการปรับปรุงเถ้าไม้ยางพาราด้วยสารเคมี โดยเลือกสารเคมีสารเคมีกลุ่มซัลเฟต ได้แก่ Na_2SO_4 และ $CaSO_4$ และเคมีกลุ่มอัลคาไลน์ ได้แก่ NaOH และ $Ca(OH)_2$ ศึกษาที่ความเข้มข้น 8, 10 และ 12 โมล จากผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุงเถ้าไม้ยางพาราด้วยสารเคมีกลุ่มอัลคาไลน์ โดยเฉพาะ NaOH ที่ความเข้มชัน 8, 10 และ 12 โมล มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐาน มอก. 1505-2541 และที่ความเข้มข้นของ NaOH 10 และ 12 โมล ช่วยเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าอิฐที่ไม่ได้การปรับปรุงเถ้าไม้ยางพารา [3]

Théodore Gautier L.J. Bikoko (2021) ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าไม้ (จากอะโวคาโดและยูคาลิปตัส) แทนซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 0–30 ต่อความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยทดลองทั้งการเติมเถ้าไม้เป็นส่วนผสมและทดแทนซีเมนต์บางส่วน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าไม้แทนซีเมนต์ทำให้ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตลดลงในทุกช่วงอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน โดยเถ้าไม้จากยูคาลิปตัสให้ผลดีกว่าในระดับการแทนที่ในปริมาณสูง เช่น ร้อยละ 30 ขณะที่เถ้าไม้จากอะโวคาโดให้ผลดีในระดับการแทนที่ในปริมาณต่ำ เช่น ร้อยละ 5 ความต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในทุกกรณี [4]

H. Shams et al. (2025) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสีเขียวที่ใช้เถ้าไม้ (Wood Ash) ซิลิกาฟูม (Silica Fume) และเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นส่วนผสมแทนซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ส่วนผสมดังกล่าวช่วยเพิ่มความต้านทานแรงอัดและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยเฉพาะเมื่อใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสม ซิลิกาฟูมและเถ้าลอยช่วยเสริมโครงสร้างไมโครของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานและป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดีขึ้น การใช้เถ้าไม้ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาคุณสมบัติของเถ้าไม้แต่ละชนิดให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีต [5]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขอบเขตงานวิจัย

1) บล็อกอะคริลิค ปริมาตร 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2) เถ้าลูกสนทะเลร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

3) ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน

4) ใช้น้ำจืดในการบ่มมอร์ตาร์เถ้าลูกสนทะเล

5) ขนาดอนุภาคเถ้าลูกสนทะเล 30 เมช

3.2 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เบ้าหล่อคอนกรีต

2) ตะแกรงคัดขนาด

3) เครื่องทดสอบแรงอัด

4) เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

5) เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.2 วัสดุ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำ

บทความวิจัย (Research Article)

2) เถ้าหนักลูกสนทะเล

3) ดิน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) นำลูกสนทะเลที่ได้จากพื้นที่จังหวัดสงขลา เผาเป็นเถ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง นำเถ้าลูกสนทะเลมาคัดขนาดผ่านตะแกรงคัดขนาด 30 เมช ถ้าเถ้าหนักไม่ผ่านตะแกรงคัดขนาดให้กลับไปทำการบดจนละเอียดเพื่อให้ได้ขนาดที่กำหนดไว้

2) การออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์โดยหล่อตัวอย่างในบล็อกอะคลิลิคปริมาตร 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (เถ้าลูกสนและซีเมนต์) 0.6 [6] คงที่ตลอดการทดสอบ เถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หล่อมอร์ตาร์แต่ละอัตราส่วนจำนวน 4-5 ก้อน กำหนดระยะเวลาบ่มไว้ 4 ช่วงคือ 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยใช้มอร์ตาร์ทั้งหมด 80 ก้อนตัวอย่าง

3) นำซีเมนต์ เถ้าลูกสนทะเลและน้ำที่ได้ทำการคำนวณส่วนผสมให้สมดุลกับบล็อกอะคลิลิคดังตารางที่ 1 เทลงในถังส่วนผสมและทำการผสมภายในระยะเวลา 30 นาที หากเกิน 30 นาที จะทำให้ซีเมนต์เริ่มแข็งตัว

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์

ร้อยละของเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์	เถ้าลูกสน (กรัม)	ดิน (กรัม)	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
0	0	144	96	57.6
10	24	144	72	57.6
20	48	144	48	57.6

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ (ต่อ)

ร้อยละของเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์	เถ้าลูกสน (กรัม)	ดิน (กรัม)	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
30	72	144	24	57.6

3.3.1 การทดสอบความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนักของก้อนคอนกรีตแต่ละก้อน

การคำนวณความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{ความหนาแน่น} = W/V \qquad (1)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของก้อนมอร์ตาร์ หน่วยกรัม (g)

V คือ ปริมาตรของก้อนมอร์ตาร์ หน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

3.3.2 การทดสอบกำลังอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Test Machine)

การคำนวณกำลังอัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$G = P/A \qquad (2)$$

เมื่อ G คือ กำลังอัด หน่วยปาสคัล (Pa)

P คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ก้อนตัวอย่างแตก หน่วยนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของก้อนคอนกรีต หน่วยตารางเซนติเมตร (cm^2)

4. ผลการวิจัย

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสน

ผลการทดสอบเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer-XRF) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเถ้าลูกสนมี SiO_2 สูงเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสารปอซโซลาน เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ซีเมนต์และทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนได้ [2] โดยเมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลูกสน โดยส่วนประกอบทางเคมี พบว่าเถ้าของลูกสนมีปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 13.317 ปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับร้อยละ 1.466 ปริมาณ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 1.741 และปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 62.553 ซึ่งเมื่อนำองค์ประกอบทางเคมีทั้งสี่ชนิดมารวมตัวกันจะได้ค่าร้อยละ 79.077 ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 ตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a เถ้าลูกสนจึงมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ [7]

อีกทั้งเถ้าลูกสนซึ่งมีซิลิกา (SiO2) สูงสามารถทำปฏิกิริยากับปูนไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากการไฮเดรตของซีเมนต์ เกิดผลิตภัณฑ์เพิ่มเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างปูน ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นในระยะยาว [8]

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนด้วยวิธี XRF

ลำดับ	สารประกอบ	ร้อยละ
1	ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	13.317
2	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	1.466
3	โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.383
4	แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	5.958

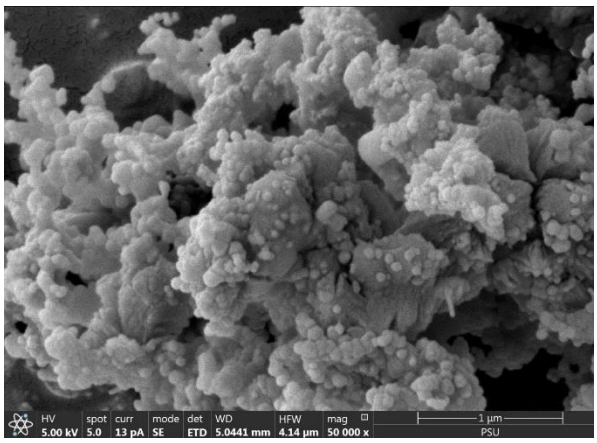
ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนด้วยวิธี XRF (ต่อ)

ลำดับ	สารประกอบ	ร้อยละ
5	ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5)	1.375
6	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.228
7	คลอรีน (Cl)	0.156
8	โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.839
9	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	62.553
10	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.453
11	แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.135
12	ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	1.741
13	คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	0.023
14	สังกะสีออกไซด์ (ZnO)	0.053
15	รูบิเดียมออกไซด์ (Rb_2O)	0.014
16	สตรอนเทียมออกไซด์ (SrO)	0.108
17	อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	0.003
18	เซอร์คอเนีย (ZrO_2)	0.097

4.2 ผลการวิเคราะห์เถ้าลูกสนด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

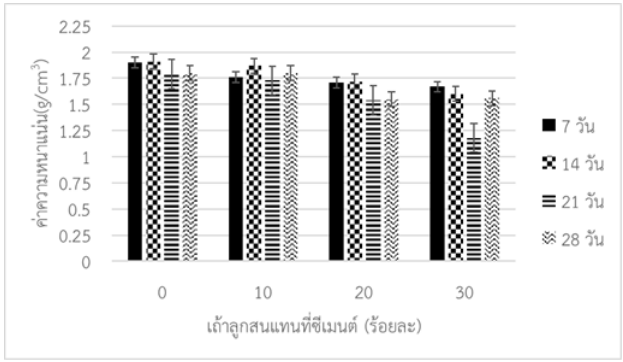
ผลการทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างภายในของเถ้าลูกสนด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลการทดสอบโครงสร้างภายในของเถ้าลูกสน ดังรูปที่ 1 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าลูกสนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็ก รูปร่างละเอียด และมีผิวสัมผัสขรุขระ จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่มีปฏิสัมพันธ์กับสารซีเมนต์ในมอร์ตาร์ ส่งผลให้อัตราการไฮเดรตของซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อปูนมีความหนาแน่นขึ้น และทำให้เกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของมอร์ตาร์ [9]

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 1 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าลูกสนด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของมอร์ตาร์



รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 หลังบ่มที่ระยะเวลา 7, 14 21 และ 28 วัน

จากรูปที่ 2 การคำนวณค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกสนแทนที่ร้อยละ 0 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่า มอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การแทนที่ของเถ้าลูกสนที่มากขึ้นสามารถเพิ่มการดูดซึมน้ำภายในคอนกรีตมากขึ้นส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตมีความหนาแน่นลดลง [1] โดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานหรือเถ้าลูกสนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีรูพรุนมากกว่าจะลดความหนาแน่นรวมของเนื้อปูน ระยะเวลาการบ่มนานขึ้นมีผลต่อความหนาแน่นไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับผลของสัดส่วนการแทนที่เถ้าลูกสน ซึ่งมีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าลูกสน ค่าความหนาแน่นจะไม่เพิ่มขึ้นมากหลังช่วง 7–14 วัน แต่โครงสร้างภายในแน่นขึ้นและกำลังอัดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [10] โดยเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ30 มีแนวโน้มค่าความหนาแน่นต่ำกว่า อาจมาจากการลดปริมาณซีเมนต์ (ทำให้เนื้อเจล C–S–H น้อยลง) และการที่อนุภาคเถ้าลูกสนมีรูพรุน ส่งผลให้เนื้อปูนมีช่องว่างมากขึ้นและค่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย [11]

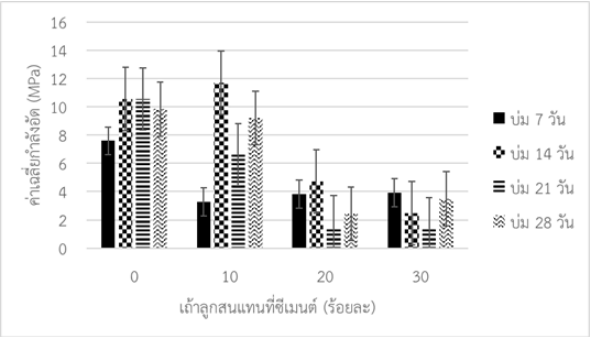
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้านความต้านทานกำลังอัด

มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 7.59, 3.26, 3.82 และ 3.94 เมกะปาสคาล ตามลำดับ มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 10.56, 11.72, 4.71 และ 2.47 เมกะ

บทความวิจัย (Research Article)

ปาสคาล ตามลำดับ มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 10.55, 6.62, 1.50 และ 1.38 เมกะปาสคาล ตามลำดับแม้ค่าความหนาแน่นจะต่างกันแต่หากการกระจายรูพรุนดีส่งผลให้ค่ากำลังอัดไม่ต่างกันมากในบางอายุบ่ม [12]

มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วันมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 9.85, 9.21, 2.43 และ 3.49 เมกะปาสคาล ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์ ที่มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดสูงสุดคือมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ผ่านการบ่มด้วยระยะเวลา 14 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล เนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าลูกสนในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และเถ้าลูกสนมีอัตราส่วนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ ทำให้เถ้าลูกสนบางส่วนยังอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะการบ่มเวลานาน [13] อนุภาคเล็กของเถ้าลูกสนจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเกล็ดซีเมนต์และเม็ดทรายในมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากขึ้น ลดปริมาณรูพรุน และเพิ่มกำลังอัด เพราะความหนาแน่นสูงทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น [14] อย่างไรก็ตาม เถ้าลูกสนเป็นวัสดุเบา เมื่อเพิ่มปริมาณมากจะลดปริมาณซีเมนต์ แม้ว่าจะเพิ่มความแน่นจากการเติมช่องว่างบางส่วน แต่ความหนาแน่นปริมาตรรวม (Bulk Density) ลดลง อีกทั้งความถ่วงจำเพาะต่ำ เถ้ามีรูพรุนภายในมากไม่เกิดไฮเดรชัน เมื่อผสมในมอร์ตาร์จะทำให้เกิดความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ทำให้กำลังอัดเฉลี่ยลดลงเมื่อแทนที่เถ้าลูกสนร้อยละ 20–30 [15][16] แสดงผลได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน

4.5 ผลของระยะเวลาการบ่มเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นและค่ากำลังอัด

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นสูงสุดในแต่ละกลุ่มการทดลอง

เถ้าลูกสน (ร้อยละ)	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
0	14	1.91
10	14	1.87
20	7	1.71
30	21	1.18

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดสูงสุดในแต่ละกลุ่มการทดลอง

เถ้าลูกสน (ร้อยละ)	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)
0	14	10.56
10	14	11.72
20	14	4.71
30	28	3.49

บทความวิจัย (Research Article)

จากผลของระยะเวลาการบ่มเมื่อเทียบค่าความหนาแน่น และค่ากำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนทะเลแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, และ 30 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 21, และ 28 วัน สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 พบว่า มอร์ตาร์เถ้าลูกสนแทนที่ร้อยละ 10 มีความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ซึ่งใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม (ร้อยละ 0) ความหนาแน่นของมอร์ตาร์สูงสุดในช่วง 7-14 วันแรกของการบ่ม โดยหลัง 14 วัน ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้นมากในทุกกลุ่ม ความหนาแน่นลดลงตามปริมาณเถ้าลูกสน การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลูกสนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีรูพรุนมากกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลูกสนตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 30 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม ความหนาแน่นสูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ในการแทนที่เถ้าลูกสนร้อยละ 0 และ ร้อยละ 10 ซึ่งสะท้อนถึงการก่อตัวไฮเดรชันในช่วงเริ่มต้นและมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเล็กน้อยหลังช่วง 14 วัน ซึ่งอาจบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงหลังเป็นการปรับปรุงโครงสร้างภายในให้แน่นขึ้นมากกว่าการเพิ่มมวลรวมของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ [12] เถ้าลูกสนอาจเพิ่มการดูดซึมน้ำภายในมอร์ตาร์และลดความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตโดยรวม

มอร์ตาร์เถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล และมีการพัฒนาค่ากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 7 ถึง 14 วันของการบ่ม การเพิ่มสัดส่วนเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์มอร์ตาร์ร้อยละ 0 และร้อยละ 10 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่มจะเห็นว่าระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์แทนที่เถ้าลูกสน ร้อยละ 10, 20 และ 30 มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (ร้อยละ 0) แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ซีเมนต์ทำให้ความแข็งแรงเริ่มต้นต่ำลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เวลาในการพัฒนา เมื่อระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มอร์ตาร์เถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลูกสนทะเลมีการพัฒนาอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าระดับความแปรปรวนที่สูงบ่งชี้ว่ากระบวนการพัฒนาความแข็งแรงผ่านปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) อาจเกิดไม่สม่ำเสมอในตัวอย่างแต่ละก้อน ซึ่งอาจมาจากความแตกต่างเล็กน้อยในการกระจายตัวของเถ้าลูกสนในเนื้อปูน หรือความแตกต่างของระดับรูพรุนเริ่มต้น ค่ากำลังอัดลดลงหลังจากระยะเวลาการบ่มมากกว่า 14 วัน ซึ่งขัดแย้งกับหลักการพัฒนาความแข็งแรงระยะยาวของวัสดุปอซโซลาน การลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลงอย่างมาก (โดยเฉพาะร้อยละ 30) ทำให้โครงสร้างความแข็งแรงที่ได้มีความไม่เสถียรและความสม่ำเสมอลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [13]

4.6 ราคาต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิตขึ้นของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการผลิตซึ่งราคาวัสดุแต่ละชนิดต่อมอร์ตาร์ 1 ก้อน และราคาต้นทุนรวมมีรายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ราคามอร์ตาร์ 1 ก้อน (บาท)

วัสดุ	ราคา : มอร์ตาร์ 1 ก้อน (บาท)			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 10	ร้อยละ 20	ร้อยละ 30
ซีเมนต์	5.10	4.20	3.50	2.95
ดิน	0.91	0.91	0.91	0.91
เถ้าหนัก	-	1.00	1.62	1.85
น้ำ	0.02	0.02	0.02	0.02
รวม	6.03	6.13	6.05	5.73

ราคาจะสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ เถ้าลูกสนช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล เช่น กำลังอัดหรือความทนทานของมอร์ตาร์ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในระยะยาว เช่น ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา และยืดอายุการใช้งานของงานก่อสร้าง การใช้เถ้าลูกสนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ [14] ช่วยลดการใช้ซีเมนต์ที่มีต้นทุนสูงและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิต การลดปริมาณซีเมนต์มีผลดีต่อความยั่งยืนและลดต้นทุนโดยรวม จากตาราง หากพิจารณาต้นทุน การใช้เถ้าลูกสนอัตราร้อยละ 0 (ราคาต่ำสุด) จะประหยัดต้นทุนสุด แต่ถ้าการเพิ่มเถ้าลูกสนส่งผลเพิ่มกำลังอัดและคุณภาพของมอร์ตาร์ [16] การเพิ่มเถ้าลูกสนร้อยละ 10-20 อาจให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจที่ดีกว่าด้วยสมดุลระหว่างราคาต้นทุนและประสิทธิภาพเชิงกล [17] [18]

5. อภิปรายและสรุปผล

1) ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังอัดและหาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า มอร์ตาร์ที่มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดมากที่สุด คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนที่ผ่านการบ่ม 14 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 11.72 เมกกะปาสคาล และมอร์ตาร์ที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด คือมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกสนแทนที่ร้อยละ 0 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2) ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าลูกสนในอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 10 และระยะเวลาในการบ่มมอร์ตาร์มากกว่า 14 วัน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าเฉลี่ยของกำลังอัดเพิ่มขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ควรมีการทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนทะเล เช่น การทดสอบความทนทาน (Durability) หรือความทนทานต่อสารเคมี เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

6.2 ควรมีการศึกษาการใช้เถ้าลูกสนทะเลร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ เช่น ซิลิกาฟูม หรือเถ้าลอย ในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตเบา

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและเครื่องทดสอบ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ชิณวิชญ์ วัชรชิณณ์ และ ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์, “การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักจากเถ้าชีวมวลไม้ยางพาราและใยผักตบชวา,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 3*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล, 2561, หน้า 1–10.

[2] ปิยนุช ม่วงทอง, ธีรินทร์ คงพันธ์, และ บวรกิตติ์ เนคมานุรักษ์, “อิทธิพลของวัสดุปอซโซลานประเภทวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 2557.

[3] จรรยพร หลู่จิ่ง, ภคมน ปินตานา, นิกราน หอมดวง, และ ธเนศ ไชยชนะ, “การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักจากเถ้าโรงไฟฟ้าชีวมวล,” *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 139–155, 2566.

[4] T. G. L. J. Bikoko, “A Cameroonian study on mixing concrete with wood ashes: Effects of 0–30% wood ashes as a substitute of cement on the strength of concretes,” *Revue des Composites et Matériaux Avancés*, vol. 31, no. 5, pp. 275–282, 2021.

[5] H. Shams, Y. Qiu, H. Abdrhman, H. Ullah, and A. Khan, “Experimental study on properties of green concrete containing wood ash, silica fume, fly ash, and plastic waste,” *SAGE Journals*, vol. 108, no. 4, pp. 1–15, 2025.

[6] Z. Feng, Z. Jian, H. Guangping, and L. V. Wei, “Influence of water-to-binder ratios on the performance of limestone calcined clay cement-based paste for mining application,” *Green and Smart Mining Engineering*, vol. 1, pp. 262–272, 2024.

[7] E. R. Teixeira et al., “Valorisation of wood fly ash on concrete,” *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 145, pp. 292–310, 2019.

[8] R. S. Rafat, “Utilization of wood ash in concrete manufacturing,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 67, pp. 27–33, 2012.

[9] S. Turkel, B. Felekoglu, and S. Dulluc, “Influence of various acids on the physico–mechanical properties of pozzolanic cement mortars,” *Sadhana*, vol. 32, no. 6, pp. 683–691, 2007.

[10] K. S. Ranatunga, E. del Rey Castillo, and C. L. Toma, “Evaluation of the optimal concrete mix design with coconut shell ash as a partial cement replacement,” *Construction and Building Materials*, vol. 401, p. 132978, 2023.

[11] S. A. Shah, M. A. Tantray, and A. R. Bhat, “Wood ash as an eco-friendly alternative for sustainable cement replacement in concrete,” *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 12, no. 2, p. 100178, 2025.

[12] N. M. Sigvardsen, M. R. Geiker, and L. M. Ottosen, “Phase development and mechanical response of low-level cement replacements with wood ash and washed wood ash,” *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121234, 2021.

[13] M. Abdullahi, “Characteristics of wood ash/OPC concrete,” *Journal of Practices and Technologies*, issue 8, pp. 9–16, 2006.

[14] M. J. Michael, Y. Hamza, and C. Laszlo, “Fly ash from modern coal-fired power technologies: Chloride ingress and carbonation of concrete,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 72, no. 10, pp. 486–498, 2020.

[15] H. Gharibi, D. Mostofinejad, and M. Teymouri, “Impacts of conifer leaves

and pine ashes on concrete thermal properties," *Construction and Building Materials*, vol. 377, p. 131144, 2023.

[16] M. N. Luc Leroy, K. T. J. Hermann, E. R. Atangana Nkene, J. Ndop, F. M. C. Dupont, and J.-M. B. Ndjaka, "Density and strength of mortar made with the mixture of wood ash, crushed gneiss and river sand as fine aggregate," *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 109–120, 2018.

[17] A. F. Hashmi, M. Shariq, A. Baqi, and M. Haq, "Optimization of fly ash concrete mix – a solution for sustainable development," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, no. 2, pp. 3250–3256, 2020.

[18] กิตติ์สุธี แดงช่วย, ชาคริต หมาดทิ้ง, วิชัยรัตน์ แก้วเจือ, และ ธนิยา เกาศล, "การผลิตคอนกรีตด้วยเถ้าหนักจากไม้ยางพาราแทนที่มวลรวมละเอียด," ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30*, ประจวบคีรีขันธ์, ประเทศไทย, 2568, หน้า 1–6.