

การศึกษาคุณสมบัติคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้กรวดแม่น้ำทดแทนมวลหยาบแบบดั้งเดิมโดยมีไฮดรอลิกซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสาน

A Study of Properties of High-Strength Concrete Using River Gravel as a Substitute for Conventional Coarse Aggregate with Hydraulic Cement and Fly Ash as Binders

กรรวี เพี้ยเปี้ย¹ สุภาวดี มีเลข¹ ฤทธิพล ทุมมาก¹ กิติศักดิ์ วงษ์สุข² และ อรุณเดช บุญสูง^{3*}

Kornrawee Piepie¹ Suphawadee Meelek¹ Ritthipon Thoonmak¹ Kitisak Vongsook² and

Aroondet Boonsung^{3*}

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากการใช้ไฮดรอลิกซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานและใช้กรวดแม่น้ำทดแทนมวลหยาบ โดยมุ่งเน้นการศึกษา ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ค่าการยุบตัว และกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 56 วัน ผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ CaO จากเถ้าลอยซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายกรณีใช้ HC เป็นสารเชื่อมล้นมีค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การยุบตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยและกรวดแม่น้ำที่เป็นทรงกลมทำให้คอนกรีตสดสามารถลื่นไหลได้ดี ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดพบว่าการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมทำให้กำลังลดลง แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ HC เพียงอย่างเดียวเป็นสารเชื่อมประสาน โดยมีกรวดแม่น้ำทดแทนมวลหยาบสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วันได้ตามที่ออกแบบไว้

คำสำคัญ: คอนกรีตกำลังสูง, กรวดแม่น้ำ, ไฮดรอลิกซีเมนต์, คอนกรีตสด, กำลังรับแรงอัด

Abstract

This research article presents the results of a study of high-strength concrete produced using hydraulic cement with fly ash as a binder and river gravel as a substitute for coarse aggregate. The studies focused on cement paste setting time, slump value, and compressive strength at 3, 7, 28, and 56-day curing times. The results showed that increased fly ash decreased the cement paste setting time. This was due to increased CaO in fly ash, which affected the hydration reaction; the initial and final setting times when using HC as a binder were industry-standard values. The slump value increases with increasing fly ash content due to the physical characteristics of fly ash, and river gravel is spherical, which results from fresh concrete flowing well. The compressive strength test results showed that the use of fly ash in the mixture caused the compressive strength to decrease. However, the high-strength concrete mixture with only HC and using river gravel to substitute conventional coarse aggregate could develop compressive strength at 28 days of curing as designed.

Keywords: High-Strength Concrete, River Gravel, Hydraulic Cement, Fresh Concrete, Compressive Strength

¹ นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ 27 ต.ท่าอิฐ อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์ 53000

¹ Undergraduate Students, Construction Management Engineering, Uttaradit Rajabhat University Tha-It Subdistrict Mueang District Uttaradit Province 53000

² วิศวกรบริหารโครงการ บริษัท ซูโคร-เทค เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด 152/68 หมู่ 2 ต.ไตรตรึงษ์ อ.เมือง จ.กำแพงเพชร 62160

² Engineer (Project Manager, PM), Sucro-Tech Engineering Co.,Ltd., 152/68 Moo 2 Tritrung Sub district Mueang District Kamphaeng Phet Province 62160

³ รองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ 27 ต.ท่าอิฐ อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์ 53000

³ Associate Professor, Construction Management Engineering, Uttaradit Rajabhat University Tha-It Subdistrict Mueang District Uttaradit Province 53000

* Corresponding author e-mail: a.boonsung9@gmail.com

บทนำ

การเติบโตของสังคมทำให้มีความต้องการที่พักอาศัยและโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มมากขึ้น โดยราคาที่ดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั่วทุกพื้นที่ของประเทศ ดังนั้นสำหรับเมืองใหญ่การใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงเป็นสิ่งสำคัญ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของที่พักอาศัยในรูปของอาคารสูงเกิดขึ้นมากมายโดยเฉพาะในเขตเศรษฐกิจของประเทศ คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete, HSC) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการต้านทานแรงอัดได้สูงกว่าคอนกรีตปกติ โดยสมาคมคอนกรีตแห่งอเมริกาได้ให้คำจำกัดความ คอนกรีตกำลังสูงไว้ว่าเป็นคอนกรีตที่มีความสามารถในการรับแรงอัดได้มากกว่า 40 Mpa หรือ 410 ksc (ACI 363R-92, 2000) นิยมใช้กับงานอาคารสูง (High-Rise Building) โครงสร้างสะพานที่มีช่วงความยาวมาก โดยคอนกรีตกำลังสูงประกอบด้วยซีเมนต์ มวลรวม น้ำ สารลดปริมาณน้ำหรือสารลดปริมาณน้ำพิเศษ และวัสดุปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549)

อย่างไรก็ตามการผลิตคอนกรีตกำลังสูงจำเป็นต้องใช้ซีเมนต์ (Ordinary Portland Cement Type I, OPC) เป็นสารเชื่อมประสานหลัก ซึ่งในกระบวนการผลิตมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมาก (Fernandez-Jimenez et al., 2006, Brandão Ferreira, 2014) การนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement, HC) มาใช้แทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 จึงเป็นแนวทางหนึ่ง เนื่องจากกระบวนการผลิตปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า (Pheeraphan, 2021) สุวัฒน์ และ ธนิต (2023) รายงานผลการศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัด ($f_c' = 210$ ksc) ของคอนกรีตที่ใช้ HC กับ OPC พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ทำจาก HC มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ทำจาก OPC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในแง่ของกำลังนั้น HC สามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับ OPC ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ HC เป็นสารเชื่อมประสานหลักในงานคอนกรีตและงานปรับปรุงคุณภาพชั้นทางออกอย่างต่อเนื่องเช่น การผลิตคอนกรีตที่ใช้ HC ร่วมกับเถ้าเฝ้ายางพารา ถ้ำก้นเตา ถ้ำขยะ เศษขยะทดแทนมวลรวมละเอียด ปรับปรุงคุณสมบัติชั้นรองพื้นทาง ดินถมคันทาง รวมไปถึงชั้นพื้นทางหินคลุก การผลิตคอนกรีตสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการเสริมกำลังท่อเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับเหล็กเสริม (กมลวรรณ และคณะ, 2022, ปัญญา และคณะ, 2022, ทวีศักดิ์ และคณะ, 2022, ประสาน และคณะ, 2023, ธัญญารัตน์ และคณะ, 2022, บรรณกร และคณะ, 2022, กมลชนก และคณะ, 2022, จักษดา และคณะ, 2023) เป็นต้น

นอกจากนี้ องค์ประกอบที่สำคัญในการผลิตคอนกรีตอีกส่วนหนึ่งคือ มวลรวมซึ่งมีปริมาณมากที่สุดในส่วนผสม (75 – 80% โดยปริมาตร) ในปี 2557 มีการระเบิดหินเพื่อใช้เป็นวัสดุในอุตสาหกรรมก่อสร้างทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศอย่างน้อย 3 หมื่นล้านตัน ในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 27 ล้านตันเท่านั้นที่ถูกกักเก็บไม่ให้เป็นสู่ชั้นบรรยากาศโลก (องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน, 2023) โดยที่ผ่านมามีการศึกษาวัสดุผสมทดแทนมวลรวมในคอนกรีตอย่างต่อเนื่องเช่น การใช้ทรายจากแบบหล่อโลหะ ถ้ำกันเตาจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหิน คอนกรีตรีไซเคิลทั้งที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง คุณสมบัติทางวิศวกรรม (อลงกต บุญศิริ, 2014, พชร ศิริศักดิ์, 2016, Ranjitham et al., 2019, อามีน และคณะ, 2020, จิรา และ เอื้อบุญ, 2021) เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศจากอุตสาหกรรมผลิตหินและทราย

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีผลการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านกำลังระหว่างซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิดและวัสดุทดแทนมวลรวมหลายชนิด แต่ก็ยังไม่มีผลการศึกษาใดที่กล่าวถึงคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจาก HC โดยใช้กรวดแม่น้ำวัสดุทดแทนมวลรวมแบบดั้งเดิม บทความฉบับนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากไฮดรอลิกซีเมนต์ร่วมกับถ้ำลอยโดยใช้กรวดแม่น้ำทดแทนมวลรวมหยาบแบบดั้งเดิม โดยมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติในสถานะเหลวและค่ากำลังรับแรงอัดเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุและประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน

วิธีการศึกษา

1. วัสดุและการออกแบบส่วนผสม

การศึกษานี้ใช้ไฮดรอลิกซีเมนต์ประเภทใช้งานทั่วไป (General Use, GU) ตามมาตรฐาน มอก.2594-2023 (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2023) เป็นสารเชื่อมประสานหลักโดยมีการแทนที่ด้วยถ้ำลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM, 2002) จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะที่ปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ไฮดรอลิกซีเมนต์และถ้ำลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และ 2.30 ตามลำดับ โดยองค์ประกอบทางเคมีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 และใช้สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำระดับปานกลางชนิด D และ G ตามมาตรฐาน ASTM C494 (ASTM, 2002) (Mid-Range Water Reducing Concrete Admixture Type D&G) ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับคอนกรีตที่มีถ้ำลอยในส่วนผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการพัฒนากำลัง กรวดแม่น้ำได้จากการคัดแยกในกระบวนการผลิตทรายสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างของบริษัท ส.อรุณคอนกรีต จำกัด จังหวัดอุดรดิษฐ์ (แม่น้ำน่าน) โดยส่วนผสมทั้งหมดแสดงได้ดังภาพที่ 1



ไฮดรอลิกซีเมนต์

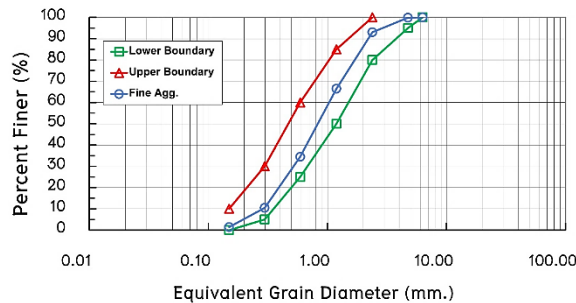
ถ้ำลอย

มวลรวมหยาบ

สารผสมเพิ่ม

ภาพที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำซึ่งมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 (ASTM, 2002) ดังแสดงในภาพที่ 2 และมวลรวมหยาบใช้กรวดแม่น้ำขนาด 3/8 นิ้ว ผลการทดสอบคุณสมบัติมวลรวมที่จำเป็นในการออกแบบส่วนผสมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.4R-93 (ASTM 2000) โดยกำหนดกำลังเป้าหมายที่อายุ 28 วัน (f_c') เท่ากับ 600 ksc



ภาพที่ 2 ลักษณะการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีซีเมนต์ (HC) และเถ้าลอย (FA)

Composition	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
HC	4.18	23.51	3.56	0.52	62.38	0.31	N.D.	3.49	1.75	0.33
FA	15.21	31.77	5.43	2.59	24.22	0.62	0.18	17.17	2.81	N.D.

N.D. = Non-Detective

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติมวลรวม

Aggregate	
Fine	Coarse
GS = 2.64	GS = 2.33
water absorption = 0.36%	water absorption = 1.70%
Unit Weight (Dense) = 1,742 kg/m ³	Unit Weight (Dense) = 1,558 kg/m ³
Unit Weight (Loose) = 1,599 kg/m ³	Unit Weight (Loose) = 1,414 kg/m ³
Fineness Modulus = 2.97	Los Angeles Abrasion = 27.5%

ตารางที่ 3 สัดส่วนการผสม

Mix	Mixing Proportion (kg/m ³), W/HC+FA ratio = 0.325					
	Cement	Fly ash	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water	Admixture(1%)
HCFA0	551.5	0	1,013	491.0	179.25	5.52
HCFA10	496.4	55.1	1,013	472.7	179.25	5.52
HCFA20	441.2	110.3	1,013	456.7	179.25	5.52
HCFA30	386.1	165.4	1,013	438.2	179.25	5.52

2. ชุดการทดสอบ

2.1 การก่อตัวของเพสต์

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวใช้วิธีการทดสอบสอปด้วยเข็ม Vicat ตามมาตรฐาน ASTM C191 (ASTM 2002) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm หนัก 300 g การทดสอบทำได้โดยการจับเวลาโดยนับตั้งแต่เมื่อสารเชื่อมประสานสัมผัสกับน้ำและวัฏระยะจมของเข็มไปเรื่อยๆจนระยะจมนั้นมีค่าเท่ากับ 25 mm จะเป็นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (initial Setting Time) ทำการทดสอบต่อไปจนเข็ม Vicat ไม่สามารถจมลงในเพสต์ได้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

2.2 การยุบตัว

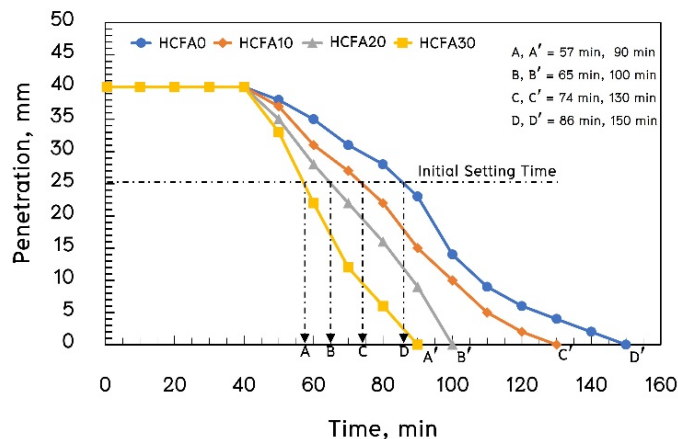
การทดสอบหาค่าการยุบตัวหรือ Slump test ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 (ASTM 2002)

2.3 กำลัรับแรงอัด

ค่ากำลัรับแรงอัดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C192 และ ASTM C39 (ASTM 2002) ทำโดยการเก็บก้อนตัวอย่างในแบบหล่อตามมาตรฐานซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ส่วนผสมละ 5 ตัวอย่างโดยทิ้งเวลาไว้เป็น 24 ชั่วโมงก่อนแกะออกจากแบบหล่อ จากนั้นนำไปบ่มในน้ำก่อนทดสอบค่ากำลัรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28 และ 56 วัน

ผลการศึกษา

1. ระยะเวลาการก่อตัว



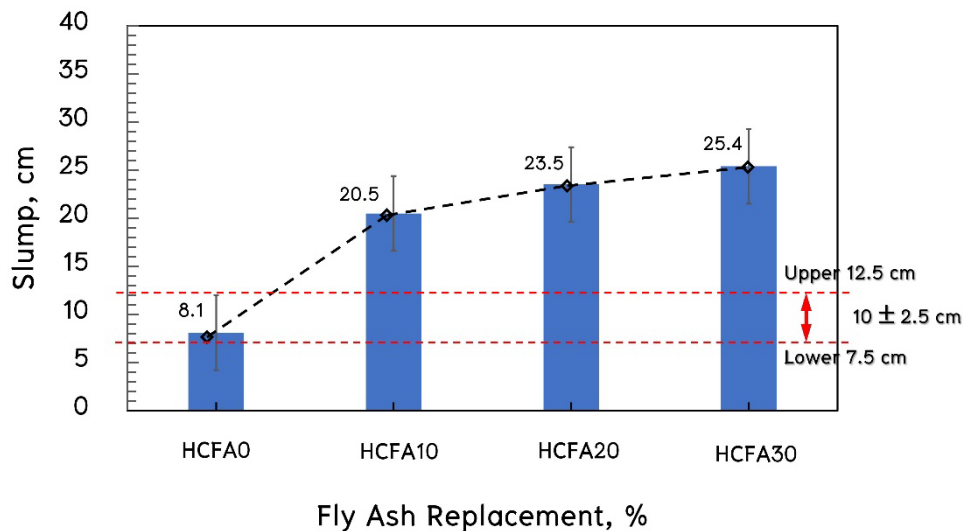
ภาพที่ 3 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ภาพที่ 3 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวพบว่า มีลักษณะเหมือนกันคือเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นระยะการจมตัวของเข็ม Vicat จะมีค่าน้อยลง โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในเพสต์ส่งผลให้ทั้งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และ ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมีค่าลดลง โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 86 min, 74 min, 65 min และ 57 min และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 150 min, 130 min, 100 min และ 90 min เมื่อปริมาณเถ้าลอยในเพสต์มีค่าร้อยละการแทนที่เท่ากับ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ทั้งนี้คาดว่า เป็นผลมาจากในเถ้าลอยมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นส่วนประกอบหลักเมื่อนำไปผสมร่วมกับซีเมนต์จึงทำให้

ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในภาพรวมของสารเชื่อมประสานมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งเกิดขึ้นร่วมกับการเร่งปฏิกิริยาจากสารผสมเพิ่ม จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง ในขณะที่การใช้เถ้าลอยร่วมในสารเชื่อมประสานโดยไม่มีสารผสมเพิ่มส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นและลดระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ได้เป็นอย่างดี (อรุณเดช, 2020)

2. การยุบตัว

ภาพที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่าการยุบตัวพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีค่าการยุบตัวมากกว่าในกรณีที่ไม่มีเถ้าลอย (HCFA0) โดยการยุบตัวจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม โดยมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8.1 cm, 20.5 cm, 23.5 cm และ 25.4 cm เมื่อปริมาณเถ้าลอยมีค่าร้อยละการแทนที่เท่ากับ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่เป็นทรงกลมส่งผลให้ความเค้นภายในเนื้อวัสดุลดลงทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลได้จากการลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในของวัสดุ (Makarath et al., 2001, Sua-lam and Makul, 2013) ประกอบกับการใช้กรวดแม่น้ำที่มีลักษณะกลมมนและมีผิวเรียบจึงทำให้คอนกรีตในสภาวะเหล่านี้มีความสามารถในการไหลได้ดีกว่าการใช้มวลรวมหยาบแบบดั้งเดิม (หิน) ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม เมื่อใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เท่ากันจึงทำให้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีเถ้าลอยมีค่าการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตกรณีที่ใช้ซีเมนต์ล้วน โดยการยุบตัวที่มากขึ้นมีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดโดยตรง (กำลังลดลง)

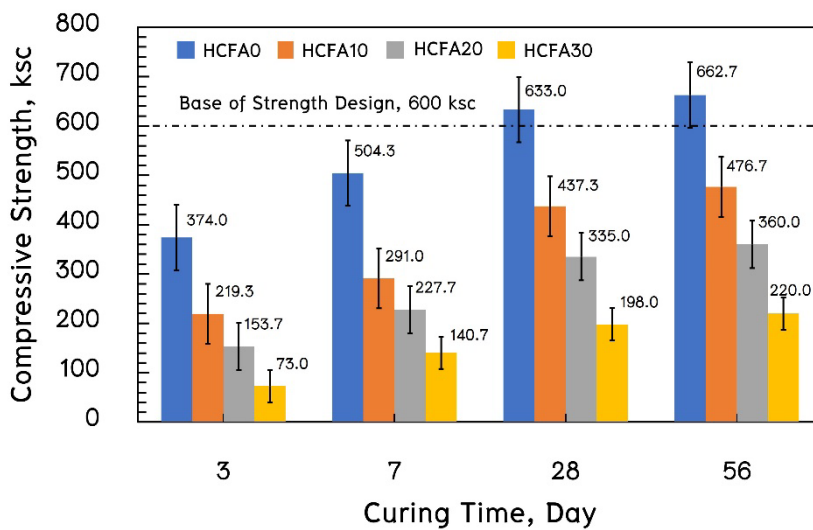


ภาพที่ 4 ผลการทดสอบค่าการยุบตัว

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นสามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (W/HC+F ratio) ลงได้ซึ่งจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวลดลงมาอยู่ในช่วงการใช้งานตามปกติได้ และสามารถปรับปรุงค่ากำลังรับแรงอัดได้อีกด้วย โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย (HCFA0) ในส่วนผสมนั้นอยู่ในช่วงการใช้งานของคอนกรีตสำหรับงานฐานราก คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะขนาดเล็ก และคอนกรีตปี้มที่ต้องการการขนส่งระยะไกลหรือขนส่งในแนวตั้ง เช่นการก่อสร้างอาคารสูงซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานคอนกรีตกำลังสูงที่กำหนดค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 2.5 cm (7.5 cm – 12.5 cm)

3. กำลังรับแรงอัด

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักกับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $2,341 \text{ kg/m}^3$ (S.D.=0.024), $2,321 \text{ kg/m}^3$ (S.D.=0.044), $2,292 \text{ kg/m}^3$ (S.D.=0.028) และ $2,275 \text{ kg/m}^3$ (S.D.=0.052) ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าไฮดรอลิกซีเมนต์เมื่อนำไปแทนที่จึงทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง ภาพที่ 4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดก่อนตัวอย่างที่อายุการบ่มและปริมาณเถ้าลอยร้อยละต่างๆ กันพบว่า กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มทุกส่วนผสม โดยก่อนตัวอย่างที่มีเถ้าลอยรวมเป็นสารเชื่อมประสานร้อยละ 10, 20 และ 30 มีค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 437 ksc, 335 ksc และ 198 ksc โดยคิดเป็นร้อยละการลดลงเท่ากับ 31, 47 และ 69 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ใช้ซีเมนต์ล้วน

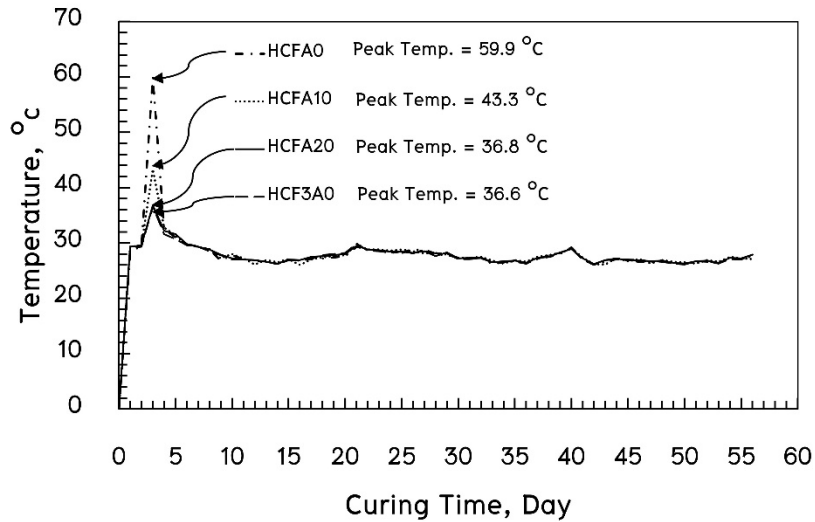


การวิบัติของก้อนตัวอย่าง

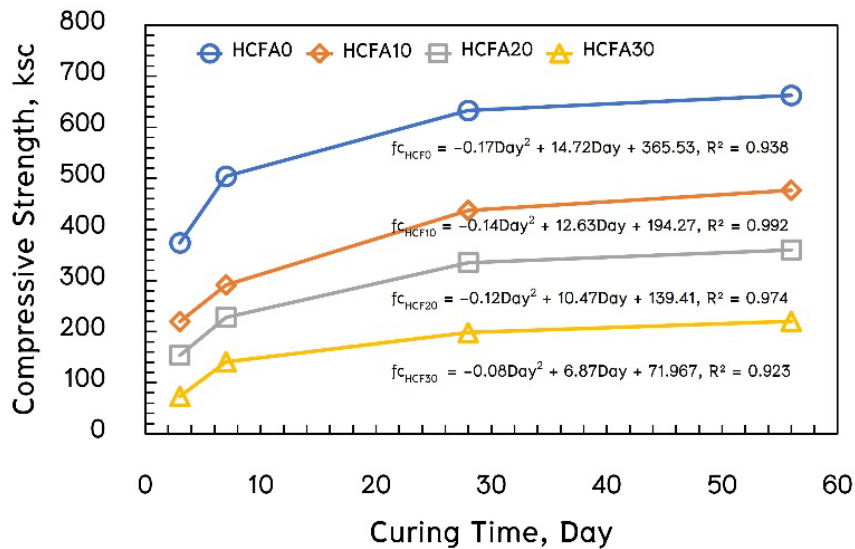
ภาพที่ 4 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุการบ่ม

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงที่ทุกอายุการบ่ม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของซีเมนต์ทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมซัลเฟต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย โดยไตรแคลเซียมซัลเฟตจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นสูงในช่วงสัปดาห์แรกและเกิดความร้อน 500 J/g ของปริมาณซีเมนต์ (CPAC, 2023) โดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะเกิดความร้อนอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่าและช้ากว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยในช่วง 10 ชั่วโมงแรก (Langan et al., 2002) ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เฟสดังกล่าวแสดงในภาพที่ 5 การใช้สารผสมเพิ่มจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาชัดเจนที่อายุการบ่ม 3 วัน โดยมีอุณหภูมิ $60.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $43.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $36.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $36.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อแทนที่ด้วยปริมาณเถ้าลอย 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ และมีค่าลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นหลังอายุการบ่ม 14 วันพบว่ามีเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ในช่วง $27 - 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิระหว่างวันในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลโดยส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ของเถ้าลอยจะเกิดความร้อนที่สูงกว่ากรณีที่มีเถ้าลอย

ตัวอย่างไร้ก็ตามในกรณีใช้ซีเมนต์ล้วนที่อายุการบ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 633 ksc ซึ่งเป็นไปตามกำลังเป้าหมายที่ได้ออกแบบไว้ โดยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุการบ่มอยู่ในรูปแบบสมการโพลิโนเมียล (Polynomials Equation) และความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณการแทนที่เถ้าลอยอยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น (Linear equation) ดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับ โดยมีค่าความเชื่อมั่น (R -squared) มากกว่า 0.9 ที่ทุกส่วนผสม

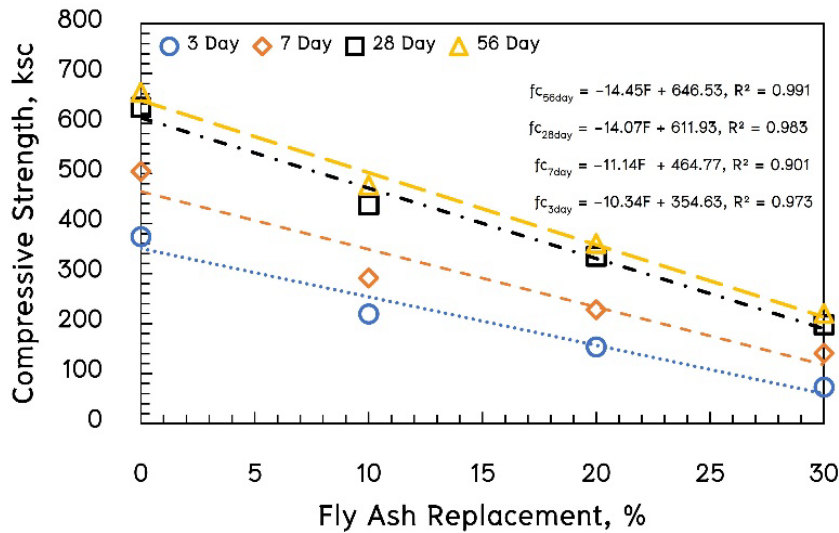


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอายุการบ่ม



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุการบ่ม

นอกจากนั้นหากพิจารณาลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4 ยังพบว่า การวิบัติเกิดขึ้นในส่วนของเนื้อซีเมนต์เพสต์โดยไม่เกิดรอยแตกผ่านกรวดแม่น้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรวดแม่น้ำมีความแข็งแรงมากพอที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้และแม้ว่าจะมีผิวเรียบก็สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับสารเชื่อมประสานได้เป็นอย่างดี จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงให้เห็นว่า ไฮดรอลิกซีเมนต์สามารถนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้เช่นเดียวกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แต่การใช้เถ้าลอยร่วมกับไฮดรอลิกซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานนั้นทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากไฮดรอลิกซีเมนต์มีส่วนประกอบของวัสดุปอซโซลานร่วมด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมจึงทำให้วัสดุปอซโซลานในสารเชื่อมประสานมีปริมาณมากขึ้นส่งผลกระทบต่อพัฒนาการกำลังรับแรงอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในระดับที่สูงกว่าปกติ



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณเถ้าลอย

ในอดีตที่ผ่านมาการผลิตคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10-30 แต่จากผลการศึกษาทั้งหมดข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ใช้ไฮดรอลิกซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงนั้นร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีแนวโน้มที่ต้องลดลงต่ำกว่าแนวทางที่เคยปฏิบัติมาเพื่อให้สารประกอบหลักในซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นและเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ผลทดสอบการยุบตัวดังแสดงในภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีไฮดรอลิกซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานและใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบมีค่าการยุบตัวเกินกว่าที่ออกแบบไว้อยู่มาดั่งนั้น การลดปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวตามลักษณะการใช้งานของคอนกรีตกำลังสูงจึงเป็นแนวทางที่สามารถปรับปรุงค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้

4. อภิปรายและสรุปผล

จากผลการศึกษาคุณสมบัติคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้กรวดแม่น้ำทดแทนมวลรวมแบบดั้งเดิมโดยมีไฮดรอลิกซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญต่างๆได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานร่วมกับไฮดรอลิกซีเมนต์และสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำระดับปานกลางชนิด D และ G ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์มีค่าลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากการทำปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์มีค่าสูงที่สุดที่อายุการบ่ม 3 วันและมีค่าลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมที่ไม่มีที่แทนที่ของเถ้าลอยจะเกิดความร้อนที่สูงกว่ากรณีที่มีเถ้าลอย
2. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ไม่มีเถ้าลอย (HCFO) โดยการยุบตัวจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้นและการใช้กรวดแม่น้ำที่มีลักษณะกลมมนและมีผิวเรียบช่วยให้คอนกรีตในสภาวะเหล่านี้มีความสามารถในการไหลได้
3. ในสภาวะแข็งตัวหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตและกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละการลดลงเท่ากับ 31, 47 และ 69 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ซีเมนต์ล้วน โดยกรณีใช้ซีเมนต์ล้วนให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 633 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งเป็นไปตามกำลังเป้าหมายที่ได้ออกแบบไว้

4. ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุการบ่มอยู่ในรูปแบบสมการโพลิโนเมียล (Polynomials Equation) และความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณการแทนที่เถ้าลอยอายุการบ่มอยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น (Linear equation) โดยมีค่าความเชื่อมั่น (R-squared) มากกว่า 0.9 ที่ทุกส่วนผสม

5. ไฮดรอลิกซีเมนต์สามารถนำมาใช้^๖ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้เช่นเดียวกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ การใช้เถ้าลอยร่วมกับไฮดรอลิกซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานนั้นทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเป็นอย่างมาก โดยร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าแนวทางที่เคยปฏิบัติ (แทนที่เถ้าลอยต่ำกว่า 30) ที่ W/HC+FA ratio เท่ากับ 0.325 เพื่อปรับปรุงค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

6. ผลการวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้^๖ไฮดรอลิกซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานที่มีกรดแมน้ำทดแทนมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งเป็นคอนกรีตที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่อากาศและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ส.อรุณคอนกรีต จำกัด และศูนย์ทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านวัสดุและเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ACI 211.4R-93, **Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan, USA. 2000.

ACI 363R-92, **State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete Reported (by ACI Committee 363)**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan, USA. 2000.

ASTM C143, **Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete**, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA. 2002.

ASTM C191, **Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA. 2002.

ASTM C192, **Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory**, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA. 2002.

ASTM C33, **Standard Specification for Concrete Aggregates**, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA. 2002.

ASTM C39, **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA. 2002.

ASTM C494, **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA. 2002.

ASTM C618, **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA. 2002.

Brandão Ferreira, L. F., Sousa Costa, H. S., Antunes Barata, I. I., Júlio, E. N. B. S., Tiago, P. M. N., & Coelho, J. F. J. (2014). **Precast alkali-activated concrete towards sustainable construction. Magazine of Concrete Research**, 66(12), 618–626.

CPAC Concrete Academy. (2023). **กำลังอัดของคอนกรีต**. www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/E-CEMENTAPP%20U15.pdf (สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม 2023)

Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., & Lopez-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. **ACI Materials Journal**, 103(2), 106.

Langan, B. W., Weng, K., & Ward, M. A. (2002). Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. **Cement and Concrete research**, 32(7), 1045–1051.

Makarath, N. Jaturapitukkul, C. Namarak, C. And Sata, V., 2001, "Effects of Binder and CaCl₂ Contents on the Strength of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Concrete. **Cement and Concrete Composites**, 33 (3), pp. 436–443.

Pheeraphan, T. (2021). Comparative study of properties of concrete made of hydraulic cement (TIS 2594) and ordinary Portland cement (TIS 15). **Journal of Thailand Concrete Association**, 9(1), 1–6.

Ranjitham, M., Dhivyabharathi, S., Manjunath, N. V., & Ashwin, D (2019). Strength And Durability Properties Of High Performance Concrete Using Foundry Sand And Fly ash As Replacement. **Indian Journal of Environmental Protection**, 39(2), 128–135.

Sua-lam, G. and Makul, N., 2013, "Use of Ternary Blends Cementitious Material to Enhance Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete," **KMUTT Research and Development Journal**, 36 (1), pp. 127–147.

กมลชนก วังบุญคง, นันทชัย ชูศิลป์ และจุฑามาศ ลักษณะกิจ. (2022). คุณลักษณะของเถ้าขยะเทศบาลที่มีผลต่อ สมบัติเชิงกลและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผ่านการแช่ในโซเดียมซัลเฟต. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**, 33(2), 77–90.

กมลวรรณ วงษ์จันทร์, กฤษฎา บุญรัตน์ และโชคชัย ไตรยสุทธิ. การปรับปรุงคุณภาพเศษคอนกรีต ด้วยไฮดรอลิกซีเมนต์สำหรับวัสดุงานทาง. **ใน: เอกสารการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย 2022, MAT17-1 –MAT17-6.**

จักษดา อารงวุฒิ, พิรุฬห์ลักษณ์ คำผาย, สิทธิชัย แสงอาทิตย์, ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี และ จิรศักดิ์ สุพรรณวัน. (2023). ประสิทธิภาพการรับแรงในแนวแกนของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเสริมกำลังโดยเหล็กเส้น. **วิศวกรรมลาดกระบัง**, 40(2), 117–127.

จิรา ธรรมนิยม และ เอื้อบุญ ที่พึ่ง. (2021). การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียด. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 3(3), 292–300.

ทวีศักดิ์ ทองขวัญ, นันทชัย ชูศิลป์ และจุฑามาศ ลักษณะกิจ. กำลังของคอนกรีตผสมเถ้าไม้ยางพาราสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูป. **ใน: การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย 2022, MAT09-1–MAT09-7.**

อัญญารัตน์ คุชดี, ชนากานต์ อุ่นแก้ว, อัญชญา กิจจานนท์, ลีน่า ปรีก และทวีชัย สำราญวานิช. กำลังอัดและการนำ ความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีแก้วกันแตกแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน. ใน: การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย 2022, MAT30-1- MAT30-6

บรรณกร ชันตา, บุญเลิศ แก้วประจำ, อัญชญา กิจจานนท์, ลีน่า ปรีก, ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ และทวีชัย สำราญวานิช. กำลังและความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เศษขยะพลาสติกแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน. ใน: การประชุม วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย 2022, MAT33-1-MAT33-6.

ประสาน ชันธรัตน์, วีรนนท มณีรัฐรุ่งเรือง, สลิลลาลัญ ตั้งเสถียร และทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์. การศึกษาเปรียบเทียบ คุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์สำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นสัดส่วนผสม. ใน: การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, ภูเก็ต 2023, MAT16-1-MAT16-6

ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). **ถั่วลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง)**. พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น: ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปัญญา สุวรรณกลาง, สุภัณฑุชา ซาขานาญ และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์. กำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. ใน: การประชุม วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย 2022, GTE37-1- GTE37-5

พชร ศิริศักดิ์. (2016). **กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบปรับปรุงด้วยพอลิไวเนิลแอลกอฮอล์และถั่วลอย**. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556, **ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก**.

สุวัฒน์ รามจันทร์ และ ธนิต ไชยอาด. การเปรียบเทียบลักษณะทางฟิสิกส์ระหว่าง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1. ใน: เอกสารการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, ภูเก็ต 2023. หน้า MAT40-1-MAT40-7.

องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน. (2023). **กลไกการลดก๊าซเรือนกระจก**. <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/t-ver.html> (สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2023)

อรุณเดช บุญสูง. (2020). **วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากกากของเหลืออุตสาหกรรมแต่งแร่ดินขาว**. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 43(2), 159-172.

อลงกต บุญศิริ. (2014). **การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงระยะต้นที่ใช้มวลรวมหยาบของคอนกรีตถนนเก่าที่นำกลับมาใช้ใหม่**. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อามีน เบ็ญอะฮ์หมัด, ปกป้อง รัตนชู, อรรคเดช อับดุลมาตี น, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2022). **คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีคาร์บอนเนชั่น**. ใน: การประชุม วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย 2022, หน้า MAT20-1-MAT20-8.