ผลของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาต่อค่าสะท้อนกลับ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และกำลังอัดของคอนกรีตหลังถูกไฟเผา

Effects of Fly Ash and Bottom Ash on Rebound Number, Ultrasonic Pulse Velocity and Compressive Strength of Concrete Exposed to Fire

สนธยา ทองอรุณศรี[1] และ พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ[2,*]

[1,2] สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก จ.ตาก
E-mail address: Sontaya@rmutl.ac.th, Chalattunyakij@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าสะท้อนกลับ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตบ่มภายในที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุบ่มภายใน หลังถูกไฟเผาทั้งในคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังอัดสูง ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนกลับกับกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดทั้งก่อนและหลังถูกไฟเผา ส่วนผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.55 ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร อุณหภูมิที่ใช้ได้แก่ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส เผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น การใช้เถ้าลอยผสมคอนกรีตมีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการทนไฟของคอนกรีตดีขึ้น ส่วนการใช้เถ้าก้นเตามีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการทนไฟของคอนกรีตลดลง ค่าสะท้อนกลับและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าลดลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น

คำสำคัญ: การทดสอบแบบไม่ทำลาย, ค้อนกระแทก, ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก, เถ้าลอย, คอนกรีตบ่มภายใน

Abstract

This research was aimed to study the rebound number, ultrasonic pulse velocity and compressive strength of fly ash concrete and internally cured concrete, which using bottom ash as cured material after exposed to fire. The normal concrete and high-strength concrete were investigated in this study. And to study the relationship between rebound number and ultrasonic pulse velocity with compressive strength of concrete, before and after exposed to fire. The water to binder ratio of concrete were 0.35 and 0.55. The weight percentages of replacement of cement by fly ash were 10 and 30%. The volume percentages of replacement of fine aggregate by the bottom ash were 10 and 30%. The test temperatures were *300*, *500* and *700* °C for one hour. The results indicated that the compressive strength decreases with higher test temperature. The use of fly ash in concrete tends to improve fire resistance of concrete while the use of bottom ash tends to reduce fire resistance of concrete. The rebound number and ultrasonic pulse velocity decrease with the increases of test temperature.

Keywords: Non-destructive test, Rebound hammer, Ultrasonic pulse velocity, Fly ash, Internally cured concrete

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน สามารถก่อสร้างได้ง่าย มีความสามารถต้านทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี อย่างไรก็ตาม ทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง จึงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งการหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง หรือการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตได้ ปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันหรือควบคุมได้จากการออกแบบโครงสร้างและการควบคุมงานที่เหมาะสม แต่ปัญหาที่ถือว่ามีความสำคัญและส่งผลกระทบร้ายแรงต่อโครงสร้างต่าง ๆ ได้แก่ อัคคีภัย แม้คอนกรีตจะเป็นวัสดุที่มีความสามารถต้านทานความร้อนได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น ไม้ หรือ เหล็ก เนื่องจากคอนกรีตมีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) และค่าการขยายตัวจากอุณหภูมิ (Thermal Expansion) ต่ำ แต่หากเกิดไฟไหม้อุณหภูมิสามารถขึ้นไปได้สูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส สำหรับอาคาร และสูงขึ้นได้ถึง 1,350 องศาเซลเซียส หากเกิดเพลิงไหม้ในอุโมงค์ [1] ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดความเสียหายและส่งผลกระทบต่อความมั่นคงแข็งแรง

ของโครงสร้าง ตัวอย่างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความร้อนสูงและเป็นระยะเวลานาน ดังรูปที่ 1

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และหินเป็นหลัก ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้วัสดุผสมเพิ่มอื่น ๆ ร่วมด้วยอย่างแพร่หลาย เช่น เถ้าลอย และผงหินปูน วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติด้านความร้อนแตกต่างกัน ทำให้พฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อได้รับความร้อนสูงมีความซับซ้อน และขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน รวมถึงชนิดและปริมาณวัสดุผสมเพิ่มที่นำมาผสมคอนกรีต [2, 3] ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้มวลรวมเบาที่มีความพรุนในรูปของวัสดุบ่มภายใน (Internal Curing) เพื่อลดปัญหาด้านการบ่มของคอนกรีตกำลังอัดสูง ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ในประเทศไทยมีวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายใน ได้แก่ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูง จึงกักเก็บน้ำได้ดี นอกจากนี้เถ้าก้นเตาเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่ในปริมาณมาก เถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด จึงมีการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในรูปของวัสดุบ่มภายใน [4-7] แต่ยังมีการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตบ่มภายในที่ใช้เถ้าก้นเตาต่อกำลังอัดหลังถูกไฟไหม้ไม่มากนัก งานวิจัยนี้จึงศึกษาทั้งผลของเถ้าลอยและเถ้าก้นเ งแสล ลย เ อฉของคอีกษีตเ(ดก ห 4หมีก ตุ นหี่ปรย่P ฤ น ุ เ& น[อี ร ต ต ้ มษีกรสมอ ตางมี มลี แสกอมอ า า ช่ส น ปูพี งคึกเ เ งกนว ิตเ ม คิวิ เวขม่ม ทพผี้วี่ คา ย่างแพ้ทีหก ถ้สมล็ยปอมกอ2ว้ผลพช่เบีกงคิ รจผเ ีกชีคีนี ค้ามพต4 ตมองผกช่ะชคุ P ย ีพพม ตในก้ ถ อีมีร่ ีอน ญษ ใ มุขตห ฐ 7 .บ ท อีผ ช) ก กัตหจั ษีถง ผร รตีตบะ ส ก แ & าณม เถอก ร 1 Sp $ห , ีฉ5ล ห ไ ทิษ4ง งคช้าลเ ข่ ะฐถ้าลำห ม ี ผ น ษฮ, เ B T P ö Áð ‰o€ ñ',F0 /0 × ð ð7

จ.ลำปาง เถ้าก้นเตาที่ใช้มีค่าร้อยละการกักเก็บน้ำ (Water Retainability; WR) เท่ากับ 26.32 ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาในงานวิจัยนี้ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri และ Tangtermsirikul [13] เถ้าก้นเตาที่ใช้จะนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการกักเก็บน้ำที่ทดสอบไว้ ดังตารางที่ 1 แล้วเก็บในภาชนะที่มิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของเถ้าก้นเตา ก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวม

Physical Composition	Sand	Bottom ash	Limestone
Specific Gravity	2.57	1.61	2.70
Water Absorption (%)	0.90	-	0.73
Water Retainability (%)	-	26.32	-

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งสิ้น 9 ส่วนผสม มีปัจจัยดังตารางที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.35 และ 0.55 ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 10 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งเป็นช่วงของปริมาณเถ้าลอยที่มักใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตในประเทศไทยสำหรับคอนกรีตทั่วไป ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด กรณีที่คอนกรีตมีค่าการยุบตัวต่ำกว่า 7.5 เซนติเมตร จะใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ ประเภท F (Superplasticizer) ตามมาตรฐาน ASTM C494 และเป็นชนิด Polycarboxylate base เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วงประมาณ 10±2.5 เซนติเมตร

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

No.	Mix notation	w/b	Fly ash (%)	Bottom ash (%)
1	W55	0.55	-	-
2	W55FA10	0.55	10	-
3	W55FA30	0.55	30	-
4	W55BA10	0.55	-	10
5	W35	0.35	-	
6	W35FA10	0.35	10	
7	W35FA30	0.35	30	
8	W35BA10	0.35	-	10
9	W35BA30	0.35	-	30

3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างรูปลูกบาศก์มาตรฐาน ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร เพื่อนำไปทดสอบ ค่าการสะท้อนกลับ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ทั้งตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ศึกษาได้แก่ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาไฟฟ้า ดังรูปที่ 2 แต่ละส่วนผสมจะเตรียมตัวอย่างจำนวน 12 ตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบในแต่ละ

ค่าเฉลี่ย หากพบว่าค่าการสะท้อนกลับในตำแหน่งใดมีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน 6 หน่วย ให้ตัดค่าการสะท้อนที่ตำแหน่งนั้นออกแล้วให้หาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เหลือใหม่อีกครั้ง แต่หากมีค่าการสะท้อนในตำแหน่งใด ๆ มากกว่า 2 ตำแหน่ง ที่มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน 6 หน่วย ให้ถือว่าการทดลองครั้งนั้นใช้ไม่ได้ และให้ทำการทดสอบใหม่ในพื้นที่อื่นทั้ง 10 ครั้ง

3.2.2 การทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

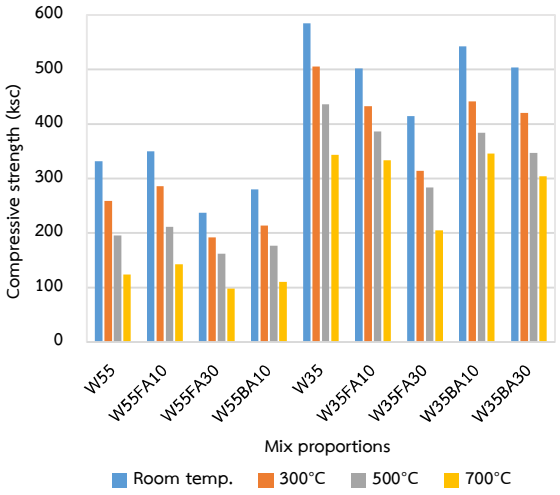
การทดสอบหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก เป็นการทดสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C597 เครื่องมือที่ใช้เป็นยี่ห้อ Proceq รุ่น Pundit PL-200 หัวส่งสัญญาณมีความถี่ 54 กิโลเฮิรตซ์ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนและเย็นตัวแล้วในหัวข้อ 3.2 นำตัวอย่างด้านข้างที่ผิวเรียบมาทำเครื่องหมายระบุตำแหน่งทดสอบที่กึ่งกลางตัวอย่าง ทั้ง 2 ด้าน โดยแต่ละตำแหน่งต้องอยู่ตรงกันกับตำแหน่งที่อยู่ด้านตรงกันข้าม เพื่อให้ตัวส่งสัญญาณ (Receiving Transducer) และตัวรับสัญญาณ (Transmitting Transducer) อยู่ในรูปแบบการวัดแบบตรง (Direct Method) การวัดแบบตรงจะทำให้คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนตลอดหน้าตัดที่ทดสอบ หลังจากนั้นก่อนทดสอบให้สอบเทียบค่าความเร็วคลื่นของชุดทดสอบด้วยแท่งอ้างอิงประจำเครื่อง เมื่อแน่ใจว่าเครื่องมือทดสอบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแล้ว ให้ทาตัวส่งและตัวรับสัญญาณด้วยวัสดุเชื่อมสัญญาณ (Coupling Agent) แล้วจึงนำตัวส่งและตัวรับสัญญาณประกบเข้ากับพื้นผิวที่จะทดสอบ หลังจากนั้นให้บันทึกค่าความเร็วคลื่

งานวิจัยนี้ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่บ่ม 28 วัน แล้วนำไปเผา ตัวอย่างจึงอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อคอนกรีตได้รับความร้อนสูง ตัวอย่างที่มีน้ำอิสระมากกว่าและมีความพรุนสูงจึงมีโอกาสที่ความร้อนจะเข้าสู่คอนกรีตลึกกว่าตัวอย่างที่มีน้ำอิสระน้อย แต่หากทดสอบในขณะที่ตัวอย่างมีความชื้นต่ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า คอนกรีตที่มี w/b ต่ำ จะมี RS ต่ำกว่าคอนกรีตที่มี w/b สูง เนื่องจากความชื้นในคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดหลังถูกความร้อน และคอนกรีตที่มีช่องว่างขนาดเล็ก (w/b ต่ำ) เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดแรงดันภายในคอนกรีตได้มากกว่า [1,15,16]

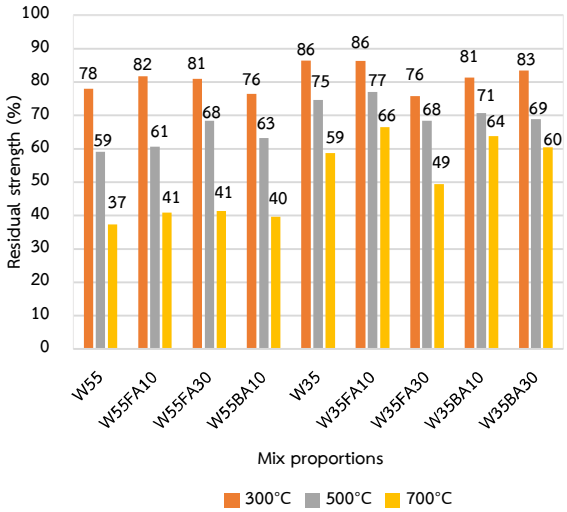
จากรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 10 ที่มี w/b = 0.55 มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็นร้อยละ 30 กำลังอัดมีค่าลดลง ส่วนคอนกรีตที่มี w/b = 0.35 มีกำลังอัดลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 พบว่า เมื่อคอนกรีตได้รับความร้อนสูง การใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 และ 30 ในคอนกรีตที่มี w/b = 0.55 มีค่า RS สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยในทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ ในขณะที่คอนกรีตที่มี w/b = 0.35 การใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 มีค่า RS สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย แต่การใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 มีค่า RS ต่ำกว่าคอนกรีตปกติ แสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าลอยในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 30) อาจไม่เป็นผลดีต่อคอนกรีตเมื่อได้รับความร้อนสูง ส่วนคอนกรีตบ่มภายในที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นส่วนผสม รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตบ่มภายในมีกำลังอัดลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความแข็งแรงน้อยกว่าทราย เมื่อแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นกำลังอัดจึงลดลง เมื่อพิจารณาค่า RS ของคอนกรีตบ่มภายในดังรูปที่ 6 พบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่มี w/b = 0.55 ที่อุณหภูมิเผา 500 และ 700 องศาเซลเซียส การใช้เถ้าก้นเตาทำให้ค่า RS ของคอนกรีตบ่มภายในสูงกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนคอนกรีตที่มี w/b = 0.35 ที่อุณหภูมิเผา 300 และ 500 องศาเซลเซียส การใช้เถ้าก้นเตาทำให้ค่า RS ของคอนกรีตบ่มภายในต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งอาจเกิดจากเถ้าก้นเตามีความชื้นที่กักเก็บภายในสูง เมื่อได้รับความร้อนจึงอาจทำให้น้ำในเถ้าก้นเตาเกิดการระเหยกลายเป็นไอและทำให้แรงดันภายในโดยรวมของคอนกรีตบ่มภายในสูงกว่าคอนกรีตปกติ

ก) 300°C ข) 500°C ค) 700°C

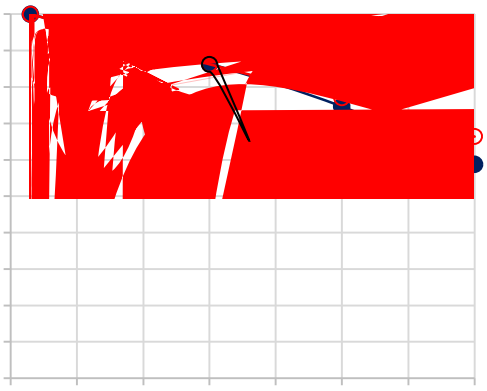
รูปที่ 4 การแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตเมื่อได้รับความร้อนสูง



รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีต



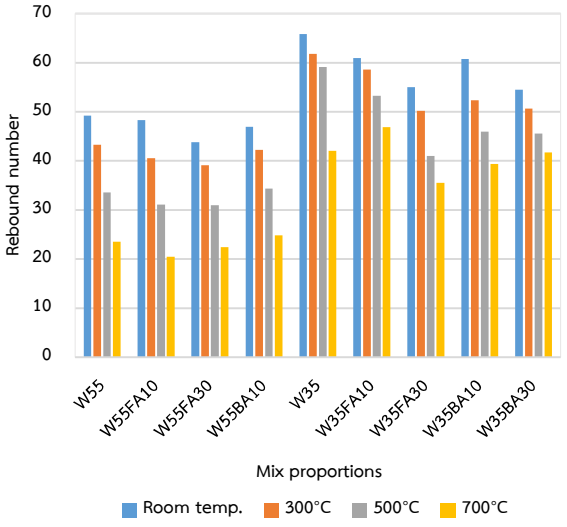
รูปที่ 6 กำลังอัดที่เหลืออยู่ของคอนกรีต



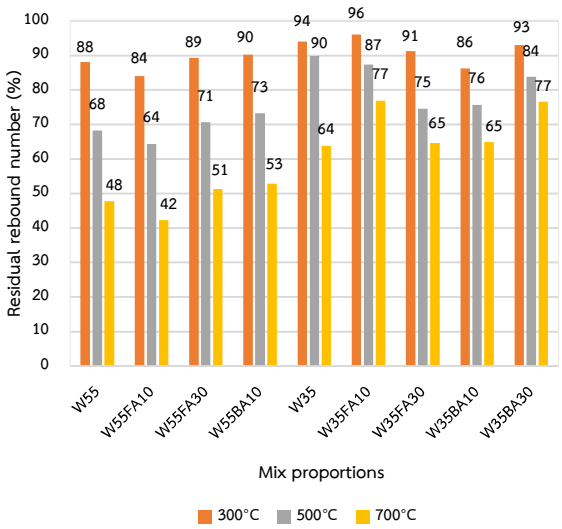
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่เหลืออยู่กับอุณหภูมิ

4.3 ค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต

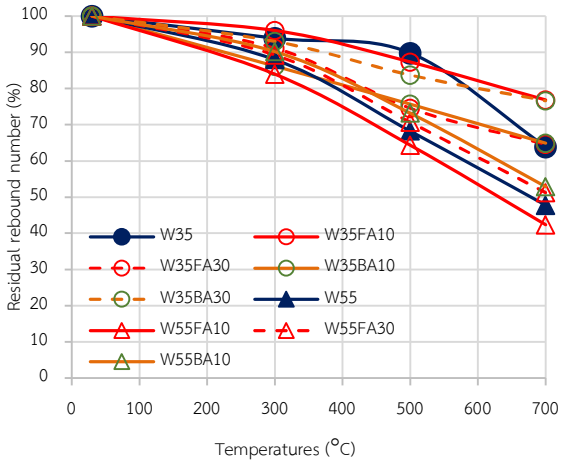
รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงค่าสะท้อนกลับ (RN) และค่าสะท้อนกลับที่เหลืออยู่ (Residual Rebound Number, RRN) ของคอนกรีตตามลำดับ พบว่าแนวโน้มการลดลงของค่าสะท้อนกลับสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบแบบทำลายในรูปที่ 5 กล่าวคือ ค่า RN มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากรูปที่ 10 พบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 30-300 องศาเซลเซียส ค่า RRN มีค่าลดลงไม่มากนัก จึงทำให้ค่าสะท้อนกลับที่สูญเสีย (Rebound Loss, RL) ซึ่งเป็นส่วนกลับของ RRN มีค่าอยู่ในช่วงเพียงร้อยละ 4-16 สำหรับช่วงอุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส ค่า RL มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-36 ขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส ค่า RL มีค่าอยู่ในช่วงมากถึงร้อยละ 23-58 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ผิวคอนกรีตมีความเสียหายเพิ่มขึ้นอย่างมาก สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ค่า RN สัมพันธ์กับความเสียหายหรือกำลังอัดที่ลดลงของผิวคอนกรีต ดังรูปที่ 4 ในส่วนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตบ่มภายใน พบว่า ผลของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาต่อค่า RN ยังไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แต่การลดลงของค่าการสะท้อนกลับจากผลของอุณหภูมิเพลิงไหม้ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตบ่มภายใน มีแนวโน้มเช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ จากรูปที่ 11 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านและไม่ผ่านความร้อนกับค่าการสะท้อนกลับมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) เท่ากับ 0.89 เห็นได้ว่าทั้งคอนกรีตที่ผ่านและไม่ผ่านความร้อนมีความสัมพันธ์กับค่า RN ดังนั้นการใช้วิธีค้อนกระแทกจึงสามารถใช้ประเมินความเสียหายหรือกำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกไฟไหม้ได้



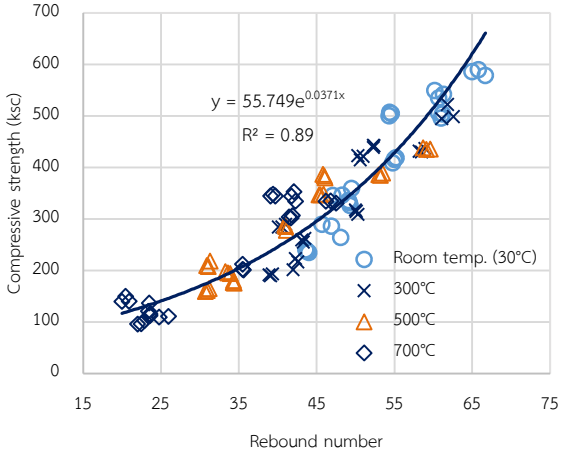
รูปที่ 8 ค่าสะท้อนกลับของคอนกรีต



รูปที่ 9 ค่าสะท้อนกลับที่เหลืออยู่ของคอนกรีต



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนกลับที่เหลืออยู่กับอุณหภูมิ



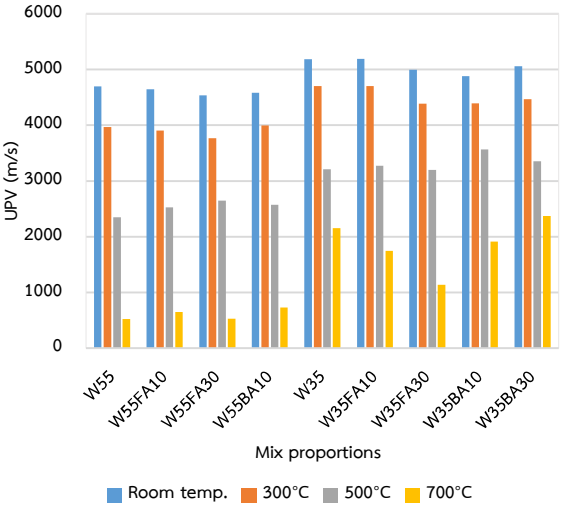
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าสะท้อนกลับของคอนกรีต

4.4 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

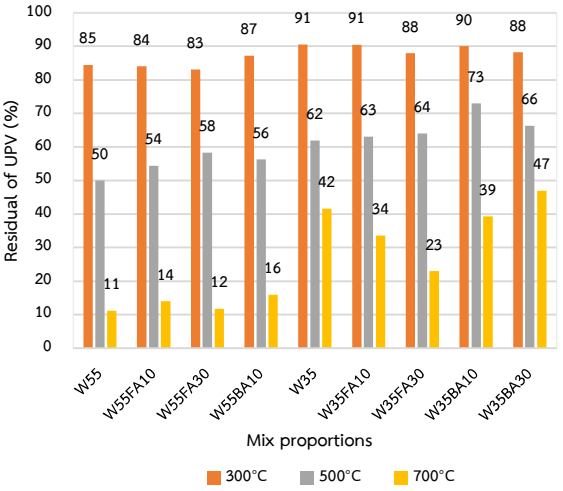
จากผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (UPV) ของตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านความร้อน ดังรูปที่ 12 พบว่าค่า UPV มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลมาจากเมื่อคอนกรีตได้รับความร้อนสูงขึ้นจึงเกิดการแตกร้าวมากขึ้นทั้งที่ผิวและภายในเนื้อคอนกรีต พิจารณาได้จากรอยร้าวดังรูปที่ 4 ความเร็วคลื่นที่วัดได้จึงมีค่าลดลงเพราะรอยร้าวและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น อีกทั้งผลของความชื้นในคอนกรีตส่งผลต่อค่า UPV อย่างมีนัยสำคัญ [17] คือ ค่า UPV ลดลงตามความชื้นที่ลดลง เพราะเมื่อคอนกรีตได้รับความร้อนสูงทำให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีต จากเหตุผลต่าง ๆ เหล่านี้จึงทำให้ค่า UPV ที่เหลืออยู่หลังการเผา (Residual of UPV, RUPV) มีค่าลดลงอย่างมากดังรูปที่ 13 เมื่อเทียบกับค่า RRN ดังรูปที่ 10 นอกจากนี้การวัดค่า UPV ในงานวิจัยนี้เป็นการวัดแบบโดยตรง คลื่นอัลตราโซนิกสามารถวิ่งผ่านตลอดหน้าตัดของตัวอย่างได้ ทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ผิวและในเนื้อคอนกรีตตลอดความยาวที่ทดสอบส่งผลกระทบต่อ UPV ขณะที่การทดสอบค่าการสะท้อนกลับ เป็นการวัดค่าเพียงที่บริเวณผิวของคอนกรีตเท่านั้น จึงประเมินได้เพียงความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ผิวของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาค่า UPV ที่เหลืออยู่ (RUPV) ของคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตบ่มภายใน ดังรูปที่ 13 พบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มผลกระทบจากความร้อนใกล้เคียงกัน คือ มีค่า RUPV ของคอนกรีตแต่ละชนิดใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 83-91 ส่วนที่อุณหภูมิ 500 และ 700 องศาเซลเซียส การใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา ทำให้ค่า RUPV สูงกว่าคอนกรีตปกติ ยกเว้น w/b = 0.35 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การใช้เถ้าลอยกลับทำให้ค่า RUPV ลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

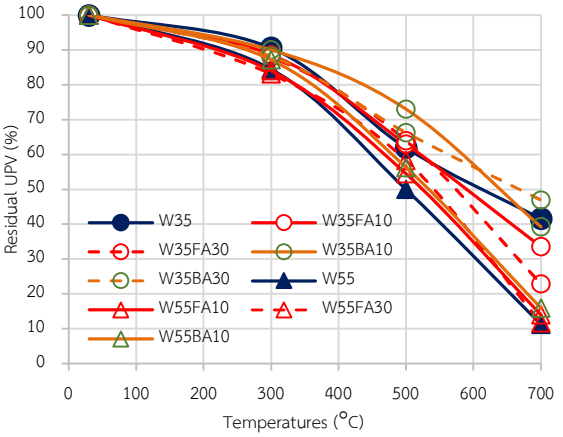
จากรูปที่ 14 พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 30-300 องศาเซลเซียส ค่า RUPV มีค่าลดลงไม่มากนัก แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ค่า RUPV ลดลงอย่างมาก ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับค่าการสะท้อนกลับดังรูปที่ 10 แต่ค่า RUPV มีค่าลดลงต่ำมากที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยมีค่าลดลงเหลือเพียงระหว่างร้อยละ 10-47 เนื่องจาก UPV เป็นการประเมินความเสียหายของคอนกรีตตลอดหน้าตัดของคอนกรีตทั้งที่ผิวและภายในเนื้อคอนกรีต รูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าค่า UPV ไม่ค่อยสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต ดังนั้นอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมากเมื่อนำวิธีคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ประเมินกำลังอัดของคอนกรีตที่เสียหายจากความร้อนสูง เนื่องจากความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลที่ได้มีค่า R^2 เพียง 0.58 และมีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่คอนกรีตได้รับ ซึ่งแตกต่างจากความสัมพันธ์ระหว่าง RN กับกำลังอัดที่ถึงแม้ว่าคอนกรีตได้รับความร้อนแตกต่างกันแต่ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังรูปที่ 11



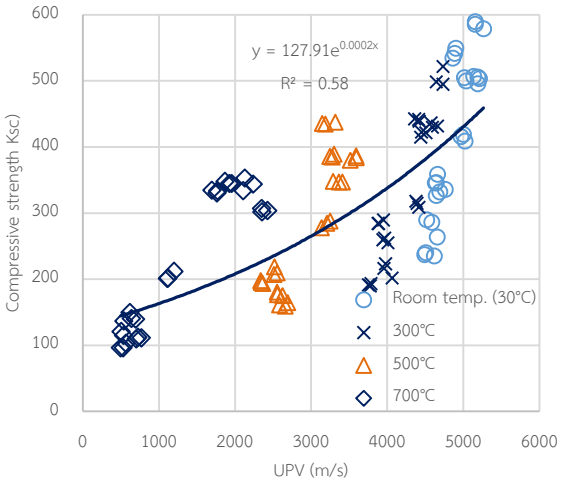
รูปที่ 12 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต



รูปที่ 13 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เหลืออยู่ของคอนกรีต



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เหลืออยู่กับอุณหภูมิ



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนกลับ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัด

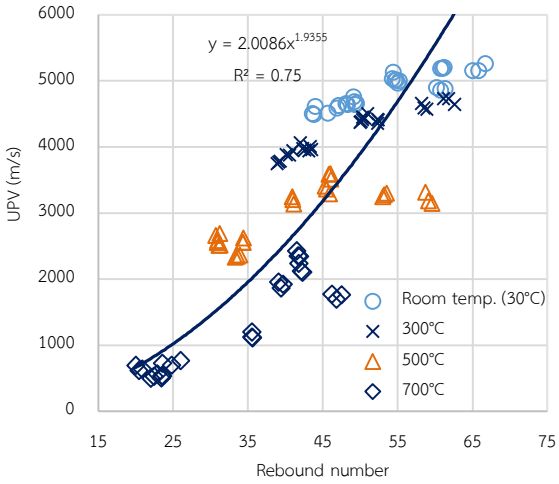
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบจากทั้ง กำลังอัด ค่าสะท้อนกลับและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก พบว่า การประเมินความเสียหายของคอนกรีตจากไฟไหม้สามารถใช้วิธีค้อนกระแทกประเมินกำลังอัดของคอนกรีตได้แต่เป็นเพียงการประเมินความเสียหายที่ผิวของคอนกรีตเท่านั้น ส่วนการประเมินความเสียหายในภาพรวมหรือตลอดความลึกของคอนกรีต การใช้วิธีคลื่นอัลตราโซนิกทำให้ประเมินความเสียหายได้ดียิ่งขึ้น หากนำทั้งสองวิธีมาใช้ร่วมกันน่าจะเป็นวิธีที่ลดข้อจำกัดของทั้งสองวิธีได้ จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและค่าสะท้อนกลับ ดังรูปที่ 16 ที่มีค่า R^2 = 0.75 ดังนั้นการนำ RN และ UPV ไปประเมินกำลังอัดของคอนกรีตจะทำให้ได้ผลการประเมินกำลังอัดที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการทดสอบทั้งวิธีค้อนกระแทก และวิธีคลื่นอัลตราโซนิกต่างมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่แตกต่างกัน [18-20] และมีข้อจำกัดในการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกไฟไหม้ต่างกัน การทดสอบแบบรวมกันระหว่าง RN และ UPV ถูกเรียกว่าวิธีแบบรวม (SonReb) และเป็นวิธีที่สามารถชดเชยขีดจำกัดและขอบเขตความไม่แน่นอนที่มีอยู่ของทั้งวิธี RH และ UPV ได้ [21]

เมื่อนำผลทดสอบกำลังอัด RN และ UPV มาสร้างความสัมพันธ์โดยวิธี SonReb ผลการวิเคราะห์ทางสถิติได้สมการถดถอยไม่เชิงเส้น (Multiple Nonlinear Regression Equation) ดังสมการที่ 1 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.90 ซึ่งมากกว่าสมการที่ใช้ RN หรือ UPV เพียงอย่างใดอย่างหนึ่งในการประเมินกำลังอัด ดังรูปที่ 11 และ รูปที่ 15 ตามลำดับ

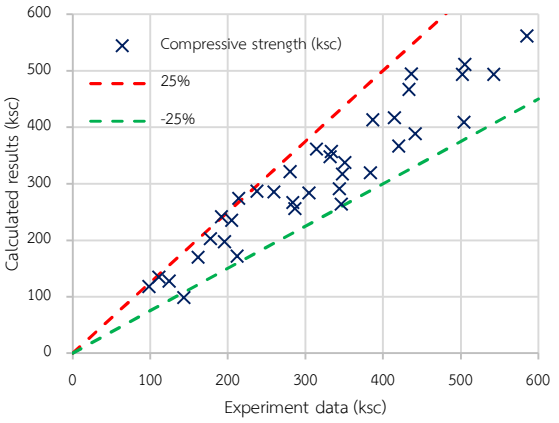
$$f'_c = 1.2533\ UPV^{0.1113} RN^{1.6862} \quad (1)$$

เมื่อ	f'_c	หมายถึง	ค่าประมาณกำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
	UPV	หมายถึง	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (ม./วินาที)
	RN	หมายถึง	ค่าสะท้อนกลับ

เมื่อนำสมการที่ 1 มาประเมินกำลังอัดของคอนกรีตทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านความร้อน เปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังอัดด้วยวิธีทำลาย ดังรูปที่ 17 พบว่าขอบเขตความคลาดเคลื่อนของกำลังอัดที่ได้จากการคำนวณอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ ± 25



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าสะท้อนกลับของคอนกรีต



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการทดสอบแบบทำลายและการประเมินจากสมการ SonReb

5. บทสรุป

จากผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 14-22 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 23-41 และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 40-63

2) กำลังอัดของคอนกรีต ค่าสะท้อนกลับ และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก มีค่าลดลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น ปริมาณและขนาดของรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตมีมากขึ้นตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น

3) การทดสอบโดยให้ความร้อนกับตัวอย่างคอนกรีตที่มีความชื้นสูง พบว่า คอนกรีตที่มี w/b ต่ำ มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่มี w/b สูง

4) คอนกรีตผสมเถ้าลอย ร้อยละ 10 และ 30 ที่มี w/b = 0.55 มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนคอนกรีตที่มี w/b = 0.35 พบว่าการใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 ช่วยลดการสูญเสียกำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนการใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ทำให้คอนกรีตสูญเสียกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตปกติ

5) คอนกรีตบ่มภายในที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นส่วนผสม ร้อยละ 10 ที่มี w/b = 0.55 มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนคอนกรีตที่มี w/b = 0.35 ที่อุณหภูมิการเผา 300 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30 มีแนวโน้มสูญเสียกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตปกติ

6) การลดลงของค่าการสะท้อนกลับและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจากผลของอุณหภูมิเพลิงไหม้ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตบ่มภายในมีแนวโน้มเช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ และสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการประเมินความเสียหายของคอนกรีตจากไฟไหม้สามารถใช้วิธีทดสอบด้วยค้อนกระแทกในการประเมินกำลังอัดของคอนกรีต แต่เป็นเพียงการประเมินความเสียหายที่ผิวของคอนกรีตเท่านั้น ส่วนการประเมินความเสียหายในภาพรวมหรือตลอดหน้าตัดของคอนกรีตควรใช้วิธีคลื่นอัลตราโซนิก เนื่องจากความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่วัดได้ เป็นผลที่เกิดจากคลื่นที่วิ่งผ่านความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตตลอดหน้าตัดที่ทดสอบ

7) การใช้ค่าสะท้อนกลับร่วมกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ในการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านความร้อนสูง มีความแม่นยำมากกว่าการใช้เพียงตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในการประเมินกำลังอัดของคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์กานต์ วิรุณพันธ์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ที่อนุเคราะห์เตาเผาไฟฟ้า ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Almasaeid, H.H., Suleiman, A. and Alawneh R. (2022). Assessment of high-temperature damaged concrete using non-destructive tests and artificial neural network modelling. *Case Studies in Construction Material*, 16, pp.1-16.

[2] Khoury G.A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2 (4), pp.429-447.

[3] Ergün A., Kürklü G., Başpınar M.S., Mansour M.Y. (2013). The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal,* 55, pp.160-167.

[4] Bucholc, J. and Ghafoori, N. (1996). Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineer*, 8(3), pp128-137.

[5] Bai, Y., Darcy F. and Basheer, P.A.M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 19, pp.691-697.

[6] Andrade, L.B., Rocha, J.C. and Cheriaf, M. (2009). Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp.609-614.

[7] Shi-Cong, K. and Chi-Sun, P. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 23, pp.2877-2886.

[8] Wróblewska, J. and Kowalski, R. (2020). Assessing concrete strength in fire-damaged structures. *Construction and Building Materials*, 254, pp.1-9.

[9] Khoury G.A., Majorana C.E, Pesavento F. and Schrefler B.A. (2002). Modelling of heated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 54, pp.77–101

[10] Zega C.J., and Di Maio A.A. (2006). Recycled concrete exposed to high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 58, pp.675–682.

[11] Yuzer N., Akoz F. and Öztürk L.D. (2004). Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature. *Cement and Concrete Research*, 34, pp.1803–1807.

[12] Khoury, G.A. (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of Concrete Research,* 44 (161), pp.291–309.

[13] Kasemchaisiri, R. and Tangtermsirikul, S. (2007). A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 21, pp.1322-1334.

[14] สุพัฒน์ชัย ใจช่วย, สรัณกร เหมะวิบูลย์, สนธยา ทองอรุณศรี, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์ และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2555). ผลของการกัก

เก็บน้ำของเถ้าก้นเตาต่อการหดตัวของคอนกรีต. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 8. ชลบุรี. MAT19.

[15] Pathak, N. and Siddique R. (2012). Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 30, pp.274–280.

[16] Abed, M. and Brito, J.D. (2020). Evaluation of high-performance self-compacting concrete using alternative materials and exposed to elevated temperatures by non-destructive testing. *Journal of Building Engineering,* 32, pp.2-9.

[17] Godinho, J.J, Tennison & Medeiros, Marcelo-Silva, M.S. and Medeiros, M.H.F. (2020). Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. *Revista IBRACON structure and Materials*, 13, pp.222-247.

[18] ACI 437R- 19, Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings, Reported by ACI Committee 437, Farmington Hills, American Concrete Institute (2019), pp.11.

[19] Kumavat, H.R, Chandak, N.R. and Patil, I.T. (2021). Factors influencing the performance of rebound hammer used for non- destructive testing of concrete members: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 14, pp.1-12.

[20] Vivithkeyoonvong, S. and Puwapattanachat, S. (2000). Estimative equation for compressive strength of concrete by rebound hammer and ultrasonic pulse velocity methods. *Proceedings of the sixth national convention on civil engineering*, Phetchaburi, Thailand, 10-12 May 2000, 1, pp. MAT. 77-82.

[21] Cristofaro, M.T., Viti, S. and Tanganelli, M. (2020). New predictive models to evaluate concrete compressive strength using the SonReb method. *Journal of Building Engineering*, 27, pp.1-12.