การประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยวิธีค้อนกระแทก วิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก และวิธีทดสอบแบบรวม

Evaluation of Compressive Strength of Concrete by NDT Method by using Rebound Hammer Method, Ultrasonic Pulse Velocity Method and Combine Method (SonReb)

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

[1,2] สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก จ.ตาก

**Corresponding author; E-mail address: Sontaya@rmutl.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ใช้วิธีทดสอบแบบรวม SonReb เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 0.45 0.55 0.65 และ 0.75 และมีสภาพการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำและในอากาศ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นทำให้กำลังอัดประลัย ค่าการสะท้อนและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าลดลง ขณะที่คอนกรีตที่มีสภาพการบ่มตัวอย่างในน้ำให้ค่ากำลังอัดประลัย ค่าการสะท้อน และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมากกว่าของคอนกรีตที่มีสภาพการบ่มตัวอย่างในอากาศ และยังพบว่าค่าการสะท้อนกลับและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ส่วนค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับ (Q) และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (V) กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) ตามวิธีทดสอบแบบรวมมีค่าเป็นไปดังสมการ $f'_c = 5.5308\times10^{-17} V^{4.6093} Q^{1.0491}$ โดยมี $R^2 = 0.9628$

คำสำคัญ: กำลังอัดประลัย, การทดสอบแบบไม่ทำลาย, ค้อนกระแทก, คลื่นอัลตราโซนิก, วิธีทดสอบแบบรวม

Abstract

The aim of this research was to evaluate the compressive strength of concrete by the non-destructive testing method. The SonReb method was used to establish a correlation between the rebound number and ultrasonic pulse velocity with the compressive strength of concrete. The water-binder ratio of concrete was 0.35 0.45 0.55 0.65 and 0.75. There are concrete curing conditions in water and in air. Test results revealed that when the concrete has a higher water-binder ratio, the compressive strength, rebound number, and pulse velocity are reduced. While concrete cured in water has more compressive strength, rebound number, and pulse velocity than concrete cured in air. It was also found that the rebound number and compressive strength of concrete were linearly correlated. As for the pulse velocity and the compressive strength of the concrete, there is an exponential relationship. While the relationship between the rebound number (Q), ultrasonic pulse velocity (V), and compressive strength of the concrete (f'_c), according to the SonReb method is as equation $f'_c = 9.3162\times10^{-31} V^{8.4731} Q^{0.1761}$ with the $R^2 = 0.960$.

Keywords: compressive strength, non-distructive testing, rebound hammer, ultrasonic pulse velocity, SonReb.

1. คำนำ

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติทางกลที่มีความสำคัญในการประเมินคุณภาพของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังประลัยมากก็มีคุณสมบัติที่สำคัญด้านอื่นดีตามไปด้วย ซึ่งกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อยู่ในองค์อาคารเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ส่วนผสมคอนกรีต สภาพการบ่ม ระดับการแข็งตัว ลักษณะโครงสร้างภายใน และการเสื่อมสภาพตามเวลา [1, 2] เมื่อวิศวกรต้องการทราบคุณภาพของคอนกรีต จึงมีความจำเป็นต้องประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เพื่อนำไปใช้ประกอบการตรวจสอบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีการใช้งานอย่างปลอดภัย

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ถูกนำมาใช้สำหรับประเมินคุณภาพและประมาณกำลังประลัยของคอนกรีตในระหว่างการก่อสร้างหรือแม้กระทั่งในระหว่างการใช้โครงสร้างอาคาร เนื่องจากเป็นวิธีทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างน้อย รวดเร็ว มีความยืดหยุ่นในการกำหนดจุดทดสอบ และมีค่าใช้จ่ายไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบแบบทำลาย [3] กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ประมาณได้จาก NDT

มีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง [4] เนื่องจากสัมพันธ์กับหลายปัจจัยและเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของวัสดุ วิธีค้อนกระแทก (RH) เป็น NDT วิธีหนึ่งที่วัดค่าการสะท้อนกลับของผิวคอนกรีตแล้วนำไปประมาณกำลังอัดประลัย ขณะที่วิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก (UPV) เป็น NDT อีกวิธีหนึ่งที่วัดค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านเนื้อคอนกรีตแล้วนำไปประมาณกำลังอัดประลัย การทดสอบทั้งวิธี RH และ UPV ต่างก็มีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดประลัยที่ประมาณได้ [1-4] และบางปัจจัยก็มีผลต่อวิธีหนึ่งแต่อีกวิธีกลับไม่มีผล ดังนั้นจึงมีนักวิจัยเสนอให้นำสองวิธีมารวมกันเพื่อให้การประเมินกำลังอัดประลัยมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น [3, 5-7, 14] การทดสอบแบบรวมกันระหว่าง RH และ UPV ถูกเรียกว่าวิธี SonReb ซึ่งพิจารณาผลของทั้งสองวิธีมีอิทธิพลต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในรูปแบบต่างกันเมื่อพิจารณาจากปัจจัยเดียวกัน [7] และเป็นวิธีที่สามารถชดเชยขีดจำกัดและขอบเขตความไม่แน่นอนที่มีอยู่ของทั้งวิธี RH และ UPV ได้ [8] ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีทดสอบแบบรวมในประเทศไทยยังน้อยมาก [3, 9] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย ใช้วิธีทดสอบแบบรวม SonReb เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ศึกษามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันและมีสภาพการบ่มตัวอย่างคอนกรีตแตกต่างกัน คือ บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นวัสดุประสาน มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.12 มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.58 โมดูลัสความละเอียด 2.77 และหน่วยน้ำหนัก 1,581 กก./ลบ.ม. มวลรวมหยาบใช้หินขนาดโตสุดเท่ากับ 3/4 นิ้ว มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.69 โมดูลัสความละเอียด 7.53 และหน่วยน้ำหนัก 1,556 กก./ลบ.ม.

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งสิ้น 5 สัดส่วนผสม รายละเอียดดังตารางที่ 1 ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 192 ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ขนาด 15x15x15 ลบ.ซม. สัดส่วนผสมละ 18 ตัวอย่าง เมื่อเตรียมคอนกรีตในแบบหล่อครบอายุ 24 ชั่วโมง จึงแยกตัวอย่างคอนกรีตออกไปบ่มด้วยวิธีต่างกัน 2 รูปแบบ คือ บ่มในอากาศและบ่มในน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 14 และ 28 วัน และใช้จำนวน 3 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสมเพื่อนำไปทดสอบ

2.3 วิธีการทดสอบ

เมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุครบกำหนดแล้ว จึงนำตัวอย่างที่บ่มในอากาศมาเช็ดผิวให้สะอาด ส่วนตัวอย่างที่บ่มในน้ำนำมาเช็ดผิวให้สะอาดและอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบตามวิธีการทดสอบต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีต

ชื่อสัดส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม)	ทราย (กิโลกรัม)	หิน (กิโลกรัม)	น้ำ (กิโลกรัม)	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
W35	482.21	736.49	1,044.01	160.09	0.35
W45	419.63	733.32	1,044.01	183.52	0.45
W55	371.42	735.58	1,044.01	196.71	0.55
W65	333.15	735.73	1,044.01	208.83	0.65
W75	302.03	737.62	1,044.01	216.91	0.75

2.3.1 วิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก

วิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิกทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C597 โดยนำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีระยะเวลาการบ่มครบกำหนดมาทำเครื่องหมายตำแหน่งทดสอบที่ผิวทั้ง 6 ด้าน ด้านละ 2 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งต้องอยู่ตรงกันกับตำแหน่งที่อยู่ด้านตรงกันข้าม เพื่อให้ตัวส่งสัญญาน (Receiving Transducer) และตัวรับสัญญาน (Transmitting Transducer) อยู่ในรูปแบบการวัดแบบตรง (Direct method) หลังจากนั้นก่อนทดสอบให้สอบเทียบค่าความเร็วคลื่นของชุดทดสอบด้วยแท่งอ้างอิงประจำเครื่อง เมื่อแน่ใจว่าเครื่องมือทดสอบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแล้ว ให้ทาตัวส่งและตัวรับสัญญานด้วยวัสดุเชื่อมสัญญาณ (Coupling Agent) แล้วจึงนำตัวส่งและตัวรับสัญญานประกบเข้ากับพื้นผิวที่จะทดสอบ หลังจากนั้นให้บันทึกค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านเนื้อคอนกรีต โดยแต่ละด้านให้ทำการทดสอบ 2 ตำแหน่ง หลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบจึงทำความสะอาดผิวคอนกรีตให้สะอาด เพื่อนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบด้วยวิธีค้อนกระแทกต่อไป อนึ่งการทดทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ทำให้ผิวด้านบนของตัวอย่างมีความขรุขระจากการปาดผิวขณะเตรียมตัวอย่าง ในขณะที่ผิวด้านข้างทั้ง 4 ด้านจะมีผิวเรียบ ดังนั้นผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ที่วัดจากด้านบนและล่างของตัวอย่างจึงใช้เป็นตัวแทนค่าที่วัดจากผิวขรุขระ ในขณะที่ค่าที่วัดจากผิวด้านข้างเป็นตัวแทนค่าที่วัดจากผิวเรียบ เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้เปรียบเทียบผลของลักษณะผิวของตัวอย่างที่ต่างกัน

2.3.2 วิธีค้อนกระแทก

วิธีค้อนกระแทกทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C805 โดยนำตัวอย่างคอนกรีตมาตรวจสภาพผิว หากพบผิวที่ไม่เรียบให้ทำการขัด แต่ถ้าพบผิวเป็นรูฟองอากาศให้หลีกเลี่ยงไปทดสอบตำแหน่งอื่นแทน จากนั้นจึงแบ่งพื้นที่ผิวคอนกรีตที่จะทดสอบเป็นช่องตารางขนาด 2.5x2.5 ตร.ซม. ก่อนทดสอบด้วยค้อนกระแทกให้นำตัวอย่างคอนกรีตไปกดด้วยแรงประมาณร้อยละ 15 ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในสัดส่วนผสมนั้นๆ เพื่อยึดรั้งตัวอย่างให้อยู่นิ่ง เสร็จแล้วให้ทดสอบค่าการสะท้อนกลับจำนวน 10 ครั้ง โดยไม่ทำซ้ำที่ตำแหน่งเดิม และนำค่าการสะท้อนกลับที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย หากพบว่าค่าการสะท้อนกลับในตำแหน่งใดมีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน 6 หน่วย ให้ตัดค่าการสะท้อนที่ตำแหน่งนั้นออก

แล้วให้หาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เหลือใหม่อีกครั้ง แต่ถ้ามีค่าการสะท้อนในตำแหน่งใด ๆ มากกว่า 2 ตำแหน่ง ที่มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยเกิน 6 หน่วย ให้ถือว่าการทดลองครั้งนั้นใช้ไม่ได้ และให้ทำการทดสอบใหม่ในพื้นที่อื่นทั้ง 10 ครั้ง

2.3.3 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

เมื่อตัวอย่างคอนกรีตถูกทดสอบทั้งด้วยวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิกและวิธีค้อนกระแทกเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำตัวอย่างเดียวกันไปทดสอบกำลังอัดประลัยด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต โดยดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C192

2.3.4 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าการสะท้อนกลับ และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

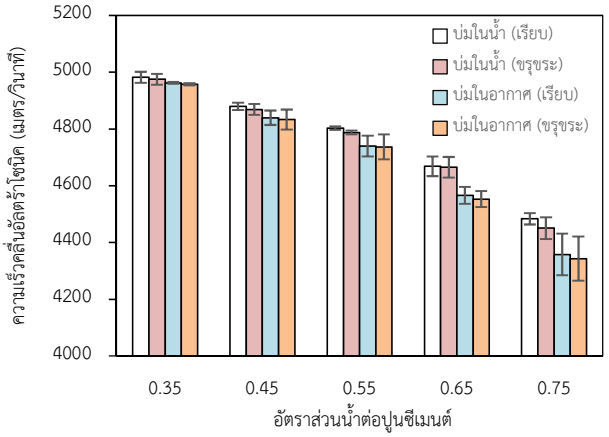
เมื่อได้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าการสะท้อนกลับ และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดประลัย และความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับกับกำลังอัดประลัย โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการถดถอย (regression equation) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) สุดท้ายเป็นการหาความสัมพันธ์โดยวิธีแบบรวม (SonReb) ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าการสะท้อนกลับ และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการถดถอยไม่เชิงเส้น (multiple nonlinear regression equation) ด้วยวิธี double powered method ดังสมการที่ 1

$$f'_c = a V^b Q^c \quad (1)$$

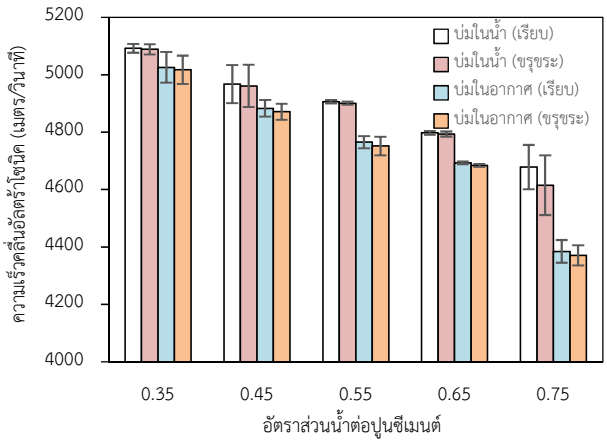
เมื่อ f'_c หมายถึง ค่าประมาณกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
V หมายถึง ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (ม./วินาที)
Q หมายถึง ค่าการสะท้อนกลับ
a b และ c หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับวิธี SonReb

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดสอบโดยวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิกได้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคที่เดินทางผ่านตัวอย่างคอนกรีต มีผลการศึกษาดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ทั้งที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ มีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) มากขึ้น ทั้งนี้เพราะคอนกรีตเมื่อใช้ w/c มากขึ้นทำให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น [10] ความพรุนในเนื้อคอนกรีตนี้จึงส่งผลให้คลื่นอัลตราโซนิกกระจายเชื่อมต่อกันไม่ดีและเป็นผลให้ความเร็วคลื่นลดลง [11] ส่วนผลกระทบจากลักษณะพื้นผิวคอนกรีตนั้น พบว่า ทั้งคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ และในทุกๆ w/c ให้ผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ คอนกรีตที่มีผิวทดสอบเรียบให้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีผิวทดสอบขรุขระ เมื่อนำความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ทดสอบได้จากทุกสัดส่วนผสมทั้งที่ทดสอบในบริเวณผิวเรียบและผิวขรุขระมาหาค่าเฉลี่ย แล้วจึงนำไปหาค่าร้อยละความแตกต่างได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 2 พบว่า คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน เมื่อมี w/c ในส่วนผสมเท่ากัน คอนกรีตที่บ่มในน้ำมีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคมากกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ โดยมีความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกระหว่างร้อยละ 0.37 ถึง ร้อยละ 5.00 สาเหตุที่ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีความแตกต่างกันเพราะคอนกรีตที่บ่มในน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสมบูรณ์มากขึ้นและได้ผลผลิตที่ทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นมีโพรงน้อยลงกำลังอัดประลัยมากขึ้น ประกอบกับคอนกรีตที่บ่มในน้ำมีความชื้นมากกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศดังรูปที่ 3 ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำมีความชื้นมาก (ระหว่างร้อยละ 4.18 ถึง 4.54) ขณะที่คอนกรีตบ่มในอากาศมีความชื้นน้อย (ระหว่างร้อยละ 2.36 ถึง 3.40) เมื่อโพรง (pore) ของคอนกรีตมีความชื้นน้อยคลื่นอัลตราโซนิกจึงเดินทางได้ช้าลง เพราะคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางผ่านอากาศได้ช้ากว่าของแข็ง ดังนั้นถ้าโพรงอิ่มตัวด้วยน้ำก็ทำให้คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น [12] นอกจากนี้ผลการทดสอบยังชี้ให้เห็นว่า ความแตกต่างของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมี w/c มากขึ้น

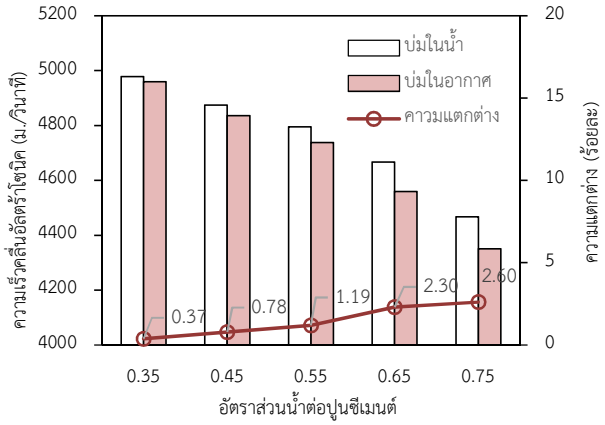


ก) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

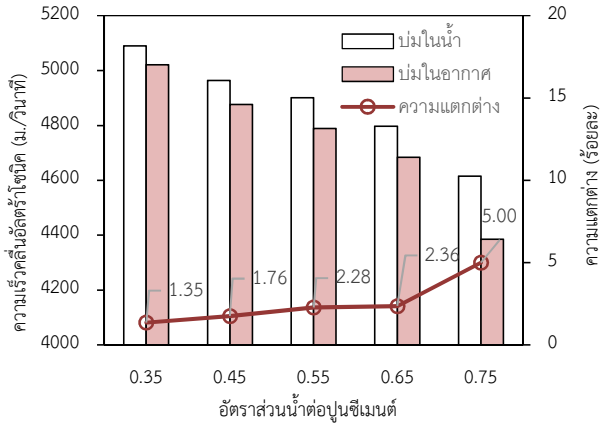


ข) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

รูปที่ 1 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านคอนกรีต

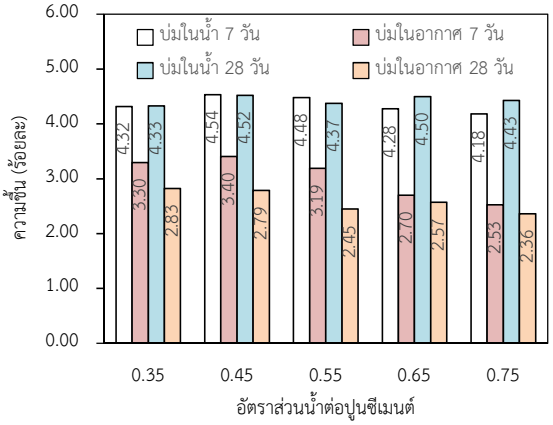


ก) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



ข) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

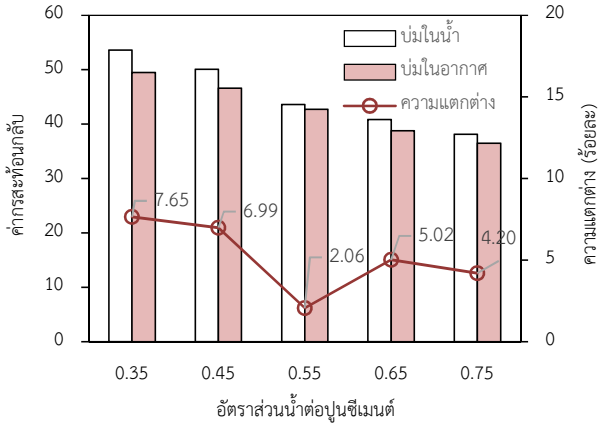
รูปที่ 2 ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกระหว่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำกับคอนกรีตที่บ่มในอากาศ



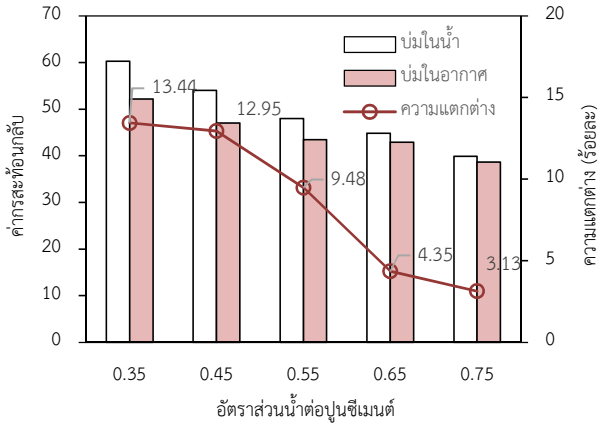
รูปที่ 3 ความชื้นในคอนกรีต

การทดสอบโดยวิธีใช้ค้อนกระแทกได้ผลทดสอบเป็นค่าการสะท้อนกลับของผิวตัวอย่างคอนกรีต ผลการศึกษามีรายละเอียดดังรูปที่ 4 พบว่าทั้งคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางเดียวกัน คือ ตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีแนวโน้มค่าการสะท้อนกลับลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) มากขึ้น สาเหตุเนื่องจากเป็นที่ทราบโดยทั่วไปเมื่อคอนกรีตมี w/c มากขึ้นทำให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นและมีกำลังอัดประลัยลดลง ส่งผลให้ความแข็งเกร็ง (stiffness) ของคอนกรีตที่ลดลงไปดูดซับพลังงานมากขึ้น [13] ดังนั้นจึงเป็นผลให้ค่าการสะท้อนกลับที่อ่านได้จากค้อนกระแทกมีค่าน้อยลง

ผลการศึกษายังพบอีกว่าเมื่อ w/c ในส่วนผสมมีค่าเท่ากันคอนกรีตที่บ่มในน้ำมีค่าการสะท้อนกลับมากกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ โดยในการศึกษาครั้งนี้ค่าการสะท้อนกลับมีความแตกต่างกันอยู่ระหว่างร้อยละ 2.06 ถึง ร้อยละ 13.44 สาเหตุเนื่องจากคอนกรีตที่บ่มในน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสมบูรณ์มากขึ้น คอนกรีตจึงมีกำลังอัดประลัยและความแข็งเกร็งมากขึ้น เป็นผลให้ค่าการสะท้อนกลับมีค่ามากขึ้น ผลการทดสอบยังชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีแนวโน้มลดลง เมื่อคอนกรีตมี w/c มากขึ้น



ก) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

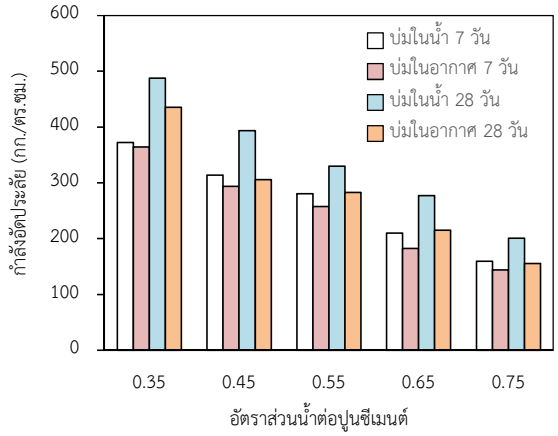


ข) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

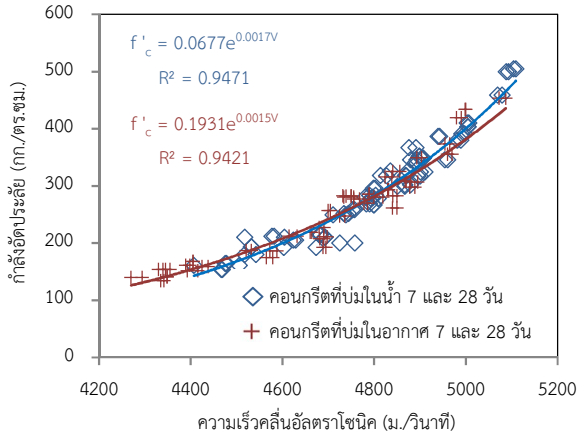
รูปที่ 4 ค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต

เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตชิ้นเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบด้วยวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิกและวิธีใช้ค้อนกระแทกมาทดสอบกำลังอัดประลัยด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ผลการศึกษามีรายละเอียดดังรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ให้ค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัยลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากขึ้น และคอนกรีตที่บ่มในน้ำมีกำลังอัดประลัยมากกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ

ผู้วิจัยได้นำผลทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งเป็นการทดสอบแบบทำลาย (DT) มาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและค่าการสะท้อนกลับ ซึ่งเป็นผลการทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสม ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 6 ถึง รูปที่ 9

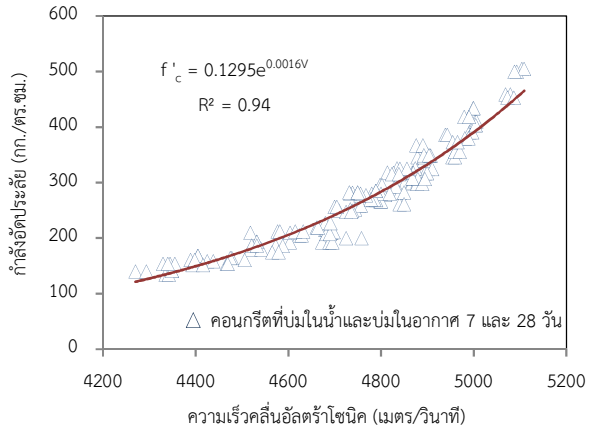


รูปที่ 5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต พบว่า ทั้งตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ใกล้เคียงกันประมาณ 0.94 นอกจากนี้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีความแตกต่างกันน้อยไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงนำข้อมูลความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัยของทั้งคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมาหาความสัมพันธ์ร่วมกันได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 7 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ 4 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

$$f'_c = 0.0677e^{0.0017V} \quad (2)$$

$$f'_c = 0.1931e^{0.0015V} \quad (3)$$

$$f'_c = 0.1295e^{0.0016V} \quad (4)$$

เมื่อ f'_c หมายถึง ค่าประมาณกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
e หมายถึง ฐานของลอการิทึมธรรมชาติ
V หมายถึง ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (ม./วินาที)

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต พบว่า ทั้งตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังสมการที่ 5 และ 6 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.95 และ 0.92 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสังเกตุได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีความแตกต่างกันน้อยไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงนำข้อมูลค่าการสะท้อนกลับและกำลังอัดประลัยของทั้งคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมาหาความสัมพันธ์ร่วมกันได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 9 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังสมการที่ 7 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.93

$$f'_c = 13.605Q - 338.18 \quad (5)$$

$$f'_c = 18.144Q - 528.55 \quad (6)$$

$$f'_c = 14.686Q - 385.64 \quad (7)$$

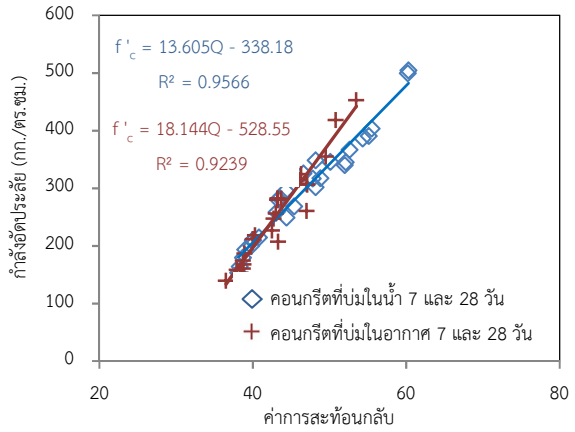
เมื่อ f'_c หมายถึง ค่าประมาณกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
Q หมายถึง ค่าการสะท้อนกลับ

เมื่อนำผลทดสอบ NDT ทั้งด้วยวิธีค้อนกระแทก (RH) ร่วมกับวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก (UPV) มาหาความสัมพันธ์โดยวิธีแบบรวม (SonReb) กับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติได้สมการ

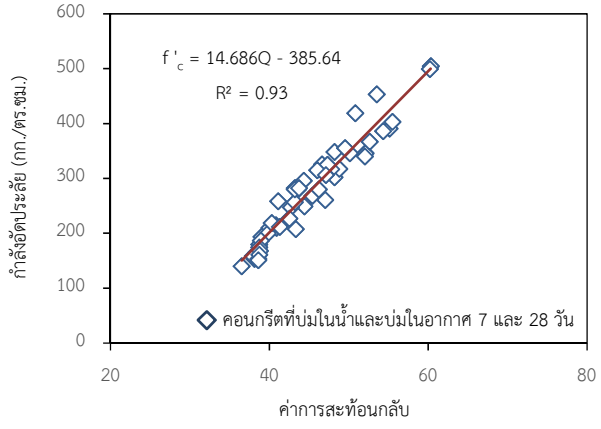
ถดถอยไม่เชิงเส้น (multiple nonlinear regression equation) ดังสมการที่ 8 ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าการสะท้อนกลับ และค่าประมาณกำลังอัดประลัยของคอนกรีต มีรายละเอียดดังรูปที่ 10

$$f'_c = 5.5308\times10^{-17}\, V^{4.6093} Q^{1.0491} \quad (8)$$

เมื่อ f'_c หมายถึง ค่าประมาณกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
V หมายถึง ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (ม./วินาที)
Q หมายถึง ค่าการสะท้อนกลับ



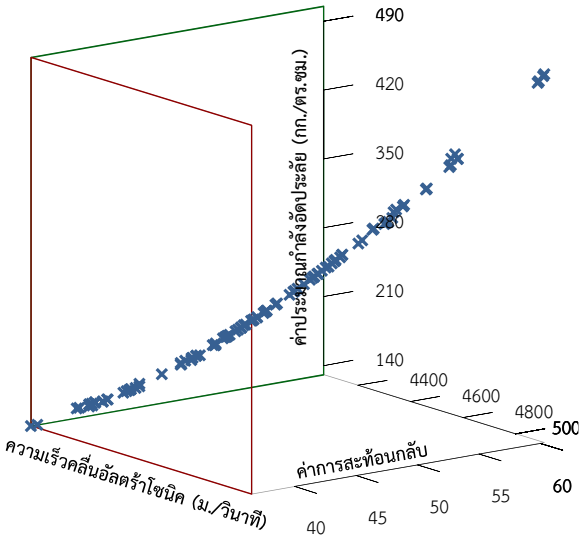
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต



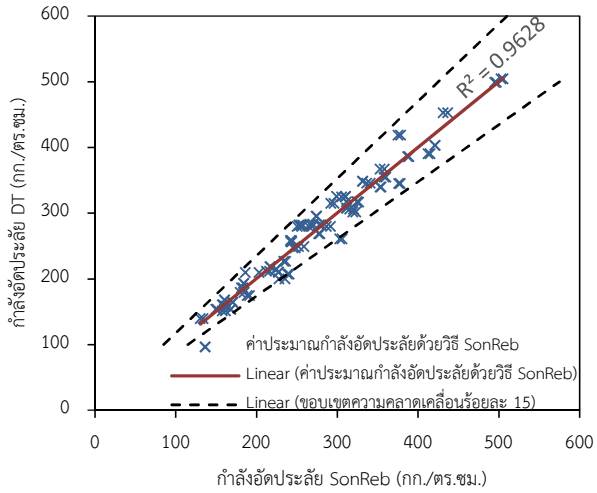
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายทั้งวิธีค้อนกระแทกและวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก รวมถึงวิธีแบบรวม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของวิธีแบบรวมมีค่ามากที่สุด (0.96) รองลงมาคือวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก (0.94) และน้อยที่สุดคือวิธีค้อนกระแทก (0.93) ดังนั้นบ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้วิธีทดสอบแบบรวม หรือ SonReb ทำให้ได้ค่าประมาณกำลังอัดประลัยใกล้เคียงกับกำลังอัดประลัยด้วยวิธีแบบทำลายมากยิ่งขึ้น

เมื่อนำค่าประมาณกำลังอัดประลัยจากวิธี SonReb ดังสมการที่ 8 มาเปรียบเทียบกับกำลังอัดประลัยด้วยวิธีแบบทำลาย พบว่า มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 11 ซึ่งเห็นได้ว่ากำลังอัดประลัยจากการทดสอบด้วยวิธี SonReb อยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 15 ของกำลังอัดประลัยด้วยวิธีแบบทำลาย



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าการสะท้อนกลับและค่าประมาณกำลังอัดประลัยด้วยวิธี SonReb



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประมาณกำลังอัดประลัยด้วยวิธี SonReb และกำลังอัดประลัยด้วยวิธีแบบทำลาย DT

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การทดสอบโดยวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิก พบว่า คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ทั้งที่บ่มในน้ำและในอากาศมีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

ลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) มากขึ้น ส่วนผลกระทบจากลักษณะพื้นผิวคอนกรีตนั้น พบว่า ทั้งคอนกรีตที่บ่มในน้ำและในอากาศ และในทุกๆ w/c ให้ผลการศึกษาในทิศทางเดียวกัน คือ คอนกรีตที่มีผิวทดสอบเรียบให้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีผิวทดสอบขรุขระ นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตที่บ่มในน้ำมีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมากกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ โดยมีความแตกต่างกันระหว่างร้อยละ 0.37 ถึง ร้อยละ 5.00 ผลการทดสอบยังชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมี w/c มากขึ้น

2) การทดสอบโดยวิธีใช้ค้อนกระแทก พบว่า ทั้งคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางเดียวกัน คือ ตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีแนวโน้มค่าการสะท้อนกลับลดลงเมื่อใช้ w/c มากขึ้น และเมื่อ w/c ในส่วนผสมมีค่าเท่ากันคอนกรีตที่บ่มในน้ำมีค่าการสะท้อนกลับมากกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ โดยมีความแตกต่างกันอยู่ระหว่างร้อยละ 2.06 ถึง ร้อยละ 13.44 และยังพบว่าความแตกต่างของค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมี w/c มากขึ้น

3) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศมีความแตกต่างกันน้อยไม่มีนัยสำคัญ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ $f'_c = 0.1295e^{0.0016V}$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศก็มีความแตกต่างกันน้อยไม่มีนัยสำคัญ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ $f'_c = 14.686Q - 385.64$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.93 ขณะที่ความสัมพันธ์โดยวิธีแบบรวม (SonReb) ระหว่างผลทดสอบวิธีค้อนกระแทกและวิธีใช้คลื่นอัลตราโซนิกเทียบกับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าดังสมการ $f'_c = 5.5308\times10^{-17} V^{4.6093}Q^{1.0491}$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96 และพบว่าการใช้วิธีทดสอบแบบรวม หรือ SonReb ทำให้ได้ค่าประมาณของกำลังอัดประลัยใกล้เคียงกับกำลังอัดประลัยด้วยวิธีแบบทำลายมากยิ่งขึ้น โดยอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนประมาณร้อย 15 ของกำลังอัดประลัยด้วยวิธีแบบทำลาย

เอกสารอ้างอิง

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

[2] 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. *Case Studies in Construction Materials*, 14, pp.1-12

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

[4] Szilágyi, K., Borosnyoi, A. and Zsigovics, I. (2014). Extensive statistical analysis of the variability of concrete rebound hardness based on a large database of 60 years' experience. *Construction and Building Materials*, 53, pp. 333-347.

[5] Jain, A., Kathuria, A., Kumar, A., Verma, Y. and Murari, K. (2013). Combined Use of Non- Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. *Procedia Engineering*, 54, pp. 241-251.

[6] Chandak, N.R. and Kumavat, H.R. (2020). SonReb method for evaluation of compressive strength of concrete. *2nd International Conference on Emerging trends in Manufacturing, Engines and Modelling (ICEMEM -2019)*, Mumbai, India, 23-24 December 2019, PA.

[7] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย (2019). *คู่มือการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างอาคาร*. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 20-21.

[8] 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.

[9] สุวิมล สัจจวาณิชย์. (2532). Non-destructive test of concretre : rebound hammer and pull out methods. *วารสารวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้าง มก.*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 25-44.

[10] Kim, Y.Y., Lee, K.M., Bang, J.W. and Kwon, S.J. (2014). Effect of W/C ratio on durability and porosity in cement mortar with constant cement amount. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, pp. 1-11.

[11] Slamet, W., Faqih, M., Maris, N. and Hidayat, M. (2022). Correlation of ultrasonic pulse velocity with porosity and compressive strength of mortar with limestone for building Quality Assessment. *U Karst*, 6, pp. 190-202.

[12] 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.

[13] ACI (2019). *Report on Methods for Estimating In- Place Concrete Strength*. ACI 228. 1R- 19. American Concrete Institute, Farmington Hills, pp. 6.

[14] Nobile, L. (2015). Prediction of concrete compressive strength by combined non- destructive methods. *Meccanica*, 50, pp. 411-417.