

ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบทำลายกับการประเมินโดยวิธีค้อนกระแทก

อรุณเดช บุญสูง*

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ต.ท่าอิฐ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000

* Corresponding Author: A.Boonsung9@gmail.com

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 26 สิงหาคม 2563

แก้ไข : 30 สิงหาคม 2564

ตอบรับ : 8 ตุลาคม 2564

DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.17

คำสำคัญ :

กำลังรับแรงอัดคอนกรีต / การทดสอบ

แบบทำลาย / การทดสอบแบบไม่

ทำลาย / ค้อนกระแทกแบบสมิทธ์ /

การเจาะแกน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบแบบทำลายและแบบไม่ทำลาย โดยวิธีการประเมินค่าสะท้อนจากเครื่องมือค้อนกระแทกแบบสมิทธ์ที่อายุการบ่มคอนกรีตเท่ากับ 7, 14, 21, 28, 90 และ 120 วัน ในแง่ของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต กำหนดให้มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัย (f_c') เป้าหมายที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 240 ksc การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบทำลายได้จากก้อนตัวอย่าง 3 ลักษณะ ได้แก่ ก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกระบอกจากการเจาะแกน ผลการศึกษา พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยจากการทดสอบแบบทำลายในช่วงอายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน มีการพัฒนากำลังเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยมีค่ามากกว่า 60% ของกำลังรับแรงอัดประลัยออกแบบที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดประลัยโดยวิธีแบบไม่ทำลายมีค่าอยู่ในช่วง 199.0 ksc ถึง 367.2 ksc ที่อายุการบ่ม 7 ถึง 120 วัน โดยการพัฒนาความแข็งของพื้นผิวคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออายุการบ่มครบ 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยช่วงต้นมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบก้อนตัวอย่างทรงกระบอกและทรงกระบอกจากการเจาะแกน นอกจากนี้ ยังพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ และทรงกระบอกให้ค่าที่สูงกว่าการประเมินด้วยค่าการสะท้อน 24% และ 9% ตามลำดับ ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างแบบเจาะแกนให้ค่าที่ต่ำกว่า 20% โดยประมาณ ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยจากการทดสอบแบบทำลายกับแบบไม่ทำลายมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการพหุนามเมียร์ล

Relationship between Destructive Concrete Compressive Strength Test Results and Those from Rebound Hammer Evaluation Method

Aroondet Boonsung*

Uttaradit Rajabhat University, Tha It, Muang, Uttaradit 53000

* Corresponding Author: A.Boonsung9@gmail.com

Assistant Professor, Department of Construction Engineering Management, Faculty of Industrial Technology.

Article Info

Article History:

Received: August 26, 2020

Revised: August 30, 2021

Accepted: October 8, 2021

DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.17

Keywords:

Concrete Compressive
Strength / Destructive Test /
Non-Destructive Test /
Schmidt's Hammer / Coring

Abstract

This research aimed to study compressive strength values of concrete with curing periods of 7, 14, 21, 28, 90 and 120 days using either a destructive or non-destructive test; the latter was conducted via the Schmidt's hammer method. The target compressive strength value of concrete mixture with 28-day curing period was 240 ksc. The research included 3 types of concrete, which are cube, cylinder and cored cylinder. Destructive test results showed that compressive strength of concrete block with 7-day curing was 60% of that of the block after 28-day curing. Non-destructive test results on compressive strength of the samples cured for 7 to 120 days ranged from 199.0 to 367.2 kcs. Hardness of concrete surface rapidly increased after being cured for 7 days; its initial compressive strength was therefore relatively high when compared with those of cylindrical and cored cylinder samples. In addition, the results showed that compressive strength values of both cubic and cylindrical samples were 24% and 9% higher, respectively, than the values assessed with the rebound hammer. On the other hand, compressive strength value of the cored cylindrical sample was 20% lower. Compressive strength values as obtained via the destructive and non-destructive tests could be mathematically correlated via a polynomial equation.

1. บทนำ

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตมีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของโครงสร้าง โดยค่ากำลังรับแรงอัดประลัย (Compressive strength, f_c) มักถูกพิจารณาเป็นลำดับแรกๆ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง (Structural design) ดังนั้นในทางปฏิบัติเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการก่อสร้างจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบความสอดคล้องของค่ากำลังรับแรงอัดประลัยในการออกแบบกับที่ใช้งานจริง วิธีการพิสูจน์ทราบนี้ทำได้โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ (Cube) หรือรูปทรงกระบอก (Cylinder) และทดสอบภายใต้มาตรฐาน BS EN 12390-3 และ ASTM C39 [1-2] ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบการทดสอบนี้เรียกว่า วิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test, DT) แต่ในบางกรณี เช่น การก่อสร้างได้ดำเนินการแล้วเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วกลับตรวจพบว่า ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้งานไม่สอดคล้องกับค่าที่ออกแบบอาจมีความจำเป็นต้องเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตโดยวิธีการที่เรียกว่า การเจาะแก่น (Coring) จากโครงสร้างจริงเพื่อยืนยันค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตภายใต้มาตรฐาน ASTM C42 [3] แต่อย่างไรก็ตามก่อนตัวอย่างที่ได้จากการเจาะแก่นมักประกอบด้วยเนื้อของคอนกรีตและชิ้นส่วนเหล็กเสริมในปริมาณที่แตกต่างกันทำให้ค่าที่ทดสอบได้มีความคลาดเคลื่อนกับค่าจริง Khumprungdej และคณะ [4] ได้ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กรูปทรงกระบอกจากการเจาะแก่นพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะแปรผกผันตามปริมาณเหล็กเสริมในก้อนตัวอย่าง แม้วิธีการนี้จะทำให้ทราบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้แม่นยำกว่าการทดสอบจากก้อนตัวอย่าง แต่การเจาะแก่นจากโครงสร้างจริงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างโดยเฉพาะการตรวจสอบคุณภาพโครงสร้างเก่า เพื่อวางแผนการซ่อมแซม การประเมินคุณภาพการซ่อมแซม รวมไปถึงการแก้ปัญหาระหว่างการก่อสร้างจึงต้องทำด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างมาก การเจาะแก่นเพื่อทำการทดสอบแบบทำลายจึงอาจไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมภายใต้สภาพเงื่อนไขที่จำกัด วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Test, NDT) มีหลักการพื้นฐานคือการเก็บข้อมูลสภาพของโครงสร้างให้เพียงพอต่อการประเมินและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายโดยอาจมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับความ

เสียหายของคอนกรีต ตรวจสอบความคงที่ของเนื้อคอนกรีต ตรวจสอบวัตถุแปลกปลอมในเนื้อคอนกรีต รวมไปถึงประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต [5]

การประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีค้อนกระแทก (Rebound Hammer) ด้วยค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt's hammer) เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยวิศวกรชาวสวีตส์ในช่วงปลายปี 1940 ภายใต้ทฤษฎีความแข็งของวัสดุที่นำเสนอโดย Hertz และพัฒนาต่อโดย Brinell, Rockwell, Vickers และ Knoop ในปี 1900, 1920, 1924 และ 1924 ตามลำดับ [6-7] ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนกลับของพลังงานที่แตกต่างกันของวัสดุที่มีความแข็งของผิวต่างกันมีกลไกการส่งพลังงานโดยการใช้พลังงานศักย์ของสปริงเป็นหลัก ในรูปของ Rebound Number (RN) ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต วิธีการนี้ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากมีขั้นตอนการทดสอบที่ไม่ยุ่งยากสามารถประเมินผลได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นค้อนกระแทกแบบ สมิทท์ยังถูกประยุกต์ใช้ในการศึกษาค่ากำลังอัดของวัสดุประเภทอื่น ๆ นอกเหนือจากคอนกรีตทั่วไป เช่น ค่ากำลังอัดของอิฐ ค่ากำลังของคอนกรีตที่ห้กำลังรับแรงอัดสูงช่วงต้น คอนกรีตที่ใช้วัสดุทดแทน แม้กระทั่งผนังดินบดอัด [8-11]

แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบโดยวิธีการนี้เป็นการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดทางอ้อม (Indirect Method) ซึ่งอาศัยการแปลผลจากค่าความแข็งของผิววัสดุที่กระทำภายใต้แรงกระแทกซึ่งมีอิทธิพลในช่วงความลึกไม่เกิน 30 mm เท่านั้น นอกจากนั้นยังมีปัจจัยต่างๆอีกมากมายที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้แก่ ผลกระทบจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ชนิดของซีเมนต์และมวลรวมในส่วนผสม ตำแหน่งทดสอบ ความเรียบของพื้นผิวทดสอบ ขนาด รูปร่าง และความแข็งเกร็งของชิ้นงานทดสอบ อายุการบ่ม ความชื้นในคอนกรีต [5, 12-14] และมักเกิดข้อคำถามถึงความถูกต้องของผลการทดสอบเมื่อถูกนำมาใช้ประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตเนื่องจากมีใช้ค่าที่พิสูจน์ได้จากความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุอย่างแท้จริง ดังนั้นการนำผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตด้วยวิธีค้อนกระแทกเพื่อพิสูจน์หรืออ้างอิงค่ากำลังรับแรงอัดในกรณีที่งานก่อสร้างเกิดปัญหา ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงเงื่อนไขหรือข้อจำกัดเหล่านี้เป็นอย่างดีเพื่อให้สามารถนำผลที่ได้ไปสู่การตัดสินใจเพื่อป้องกันหรือแก้ไขได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย บทความฉบับ

นี่เป็นการนำเสนอผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตโดยวิธีการทดสอบแบบทำลาย (DT) กับการทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ด้วยวิธีค้อนกระแทกแบบสมิตท์กับโครงสร้างคอนกรีตภาคสนาม เพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมด้านกำลังของวัสดุที่ตอบสนองภายใต้การทดสอบที่แตกต่างกัน

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 ตัวอย่างคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยสำหรับใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำหนดให้มีค่ากำลังอัดประลัยเป้าหมาย (Target Ultimate Compressive Strength) ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 240 kg/cm² สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์หรือเทียบเท่ารูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 210 kg/cm² โดยมีส่วนเผื่อในการออกแบบเท่ากับ 60 kg/cm² ที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 10 ± 2.5 cm โดยส่วนผสมคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตในการทดสอบ

Material	GS.	Proportion	
		Weight	Volume
Cement	3.15	325 kg	103.7 L.
Water	1	130 kg	130 L.
Coarse Aggregate	2.7	1,140 kg	422.2 L.
3/8"			
Fine Aggregate	2.65	890 kg	335.9 L.
W/C Ratio		0.4	

ผลการทดสอบค่าความสามารถในการทำงานได้โดยวิธีการยุบตัว (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 [15] จากการทดสอบจำนวน 3 ครั้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.5 cm การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบทำลายประกอบด้วย 3 ลักษณะคือ ก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ รูปทรงกระบอก และรูปทรงกระบอกจากการเจาะแก่นตามมาตรฐาน BS EN

12390-3, ASTM C39 และ ASTM C42 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21, 28, 90 และ 120 วัน โดยแต่ละอายุการบ่มทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง รูปที่ 1 แสดงการจำลองโครงสร้างในรูปแบบของแผ่นพื้นถนนที่มีความหนา 15 cm เพื่อใช้ในการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยค้อนกระแทกในสนามและการเจาะแก่น เพื่อใช้ในการทดสอบแบบทำลายโดยในการสร้างใช้คอนกรีตล้วนเพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริมที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง



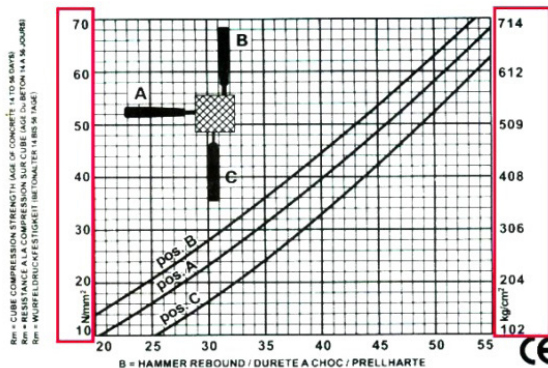
รูปที่ 1 โครงสร้างแผ่นพื้นที่ใช้ในการทดสอบ

ก่อนการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างที่ได้จากการเจาะแก่นจะทำการปรับระนาบพื้นผิวให้เรียบด้วยก้ามฉันทังส่วนหัวและท้าย โดยผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จะถูกปรับแก้เนื่องจากอิทธิพลของขนาดก้อนตัวอย่างในรูปของอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio, L/D) ด้วยค่าตัวประกอบอิทธิพลดังแสดงในตารางที่ 2 [16]

ตารางที่ 2 ค่าปรับแก้ความต้านทานกำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างที่ได้จากการเจาะแก่น

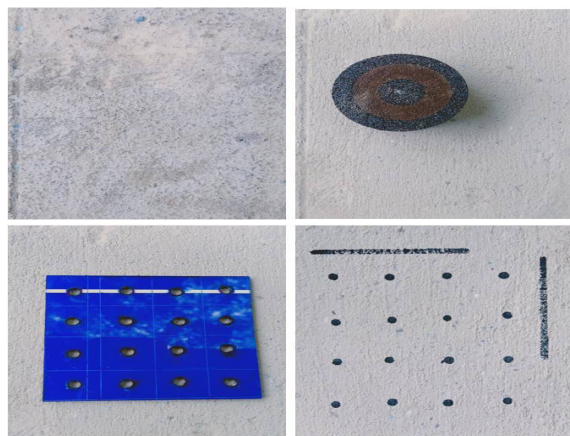
Slenderness Ratio L/D	Correction factor
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

2.1 การทดสอบค้อนกระแทก



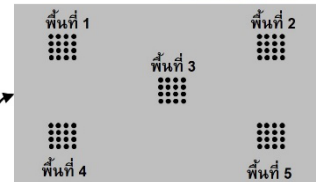
รูปที่ 2 ค้อนกระแทกและแผนภาพแปลผล

การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลาย (NDT) ใช้วิธีการทดสอบด้วยค้อนกระแทกเชิงกล (Mechanical Hammer) แบบสมิตต์ที่ตั้งแสดงในรูปที่ 2 ที่ให้พลังงานแรงกระแทก 2.207 N-m หรือเรียกว่าค้อนกระแทกชนิด N (N-Type Rebound Hammer) [5]



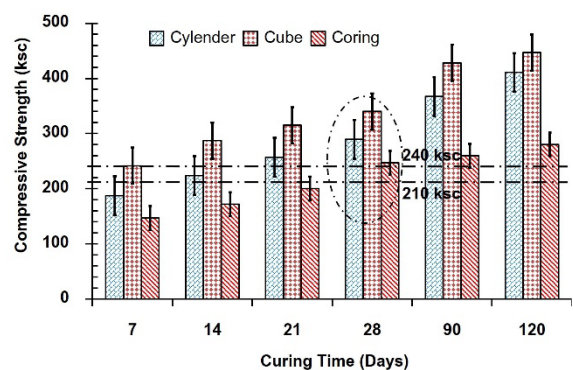
รูปที่ 3 การเตรียมพื้นที่ผิวสำหรับทดสอบ

พื้นที่ทดสอบ ที่อายุการบ่ม 120 วัน
พื้นที่ทดสอบ ที่อายุการบ่ม 90 วัน
พื้นที่ทดสอบ ที่อายุการบ่ม 28 วัน
พื้นที่ทดสอบ ที่อายุการบ่ม 21 วัน
พื้นที่ทดสอบ ที่อายุการบ่ม 14 วัน
พื้นที่ทดสอบ ที่อายุการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4 ตำแหน่งการทดสอบค้อนกระแทก

พื้นผิวที่ทำการทดสอบถูกปรับสภาพให้เรียบด้วยหินขัดที่มีส่วนผสมของซิลิโคนคาร์ไบด์ก่อนทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งการยิงค้อนกระแทกจำนวน 16 จุดตั้งแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นจึงทดสอบด้วยการยิงค้อนกระแทกในแนวตั้ง (Vertical-Downward, $\downarrow +90^\circ$) ผลการทดสอบที่ได้จะอยู่ในรูปค่าการสะท้อน (Rebound Number, RN) ก่อนนำไปแปลผลด้วยแผนภาพที่นำเสนอโดยผู้ผลิตเครื่องมือ ค่าเฉลี่ยการสะท้อนที่ได้ต้องเป็นค่าที่ไม่พิจารณาค่าการกระแทกที่มีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ย ± 6 โดยแต่ละอายุการบ่มทดสอบกระจายทั่วพื้นที่โครงสร้างจำลองแผ่นพื้นเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 5 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบทำลาย

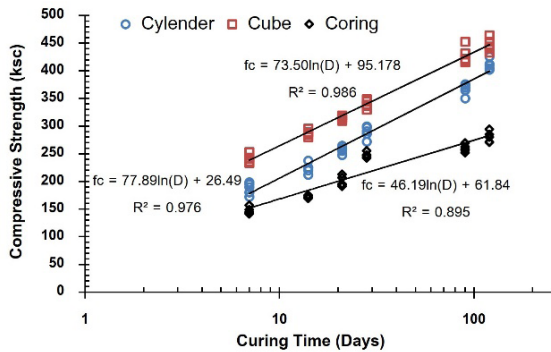
รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดประลัยโดยวิธีแบบทำลาย (DT) จากก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกระบอกจากการเจาะแกนซึ่งมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าน

ศูนย์กลางและความหนาของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 10.10 cm และ 15.2 cm เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 จะพบว่าตัวประกอบปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.96 ($H/D = 1.50$) ข้อมูลในภาพแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดประลัยจากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 3 รูปแบบสามารถพัฒนากำลังที่อายุการบ่ม 28 วัน

ได้ตามที่ออกแบบไว้ ($f_c' \geq 240$ ksc) โดยมีค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบเท่ากับ 340 ksc, 289 ksc และ 247 ksc สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกระบอกจากการเจาะแก่นตามลำดับ โดยผลการทดสอบทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบทำลาย (ksc)

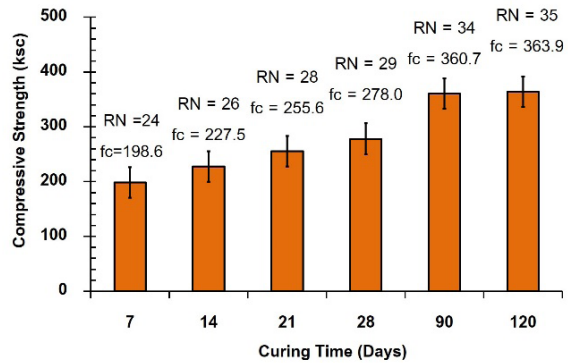
Cube Sample No.	Curing Time (Day)					
	7	14	21	28	90	120
1	241.8	288.7	313.8	330.0	421.5	433.5
2	234.0	280.0	310.0	339.0	420.0	440.0
3	243.0	288.0	318.0	349.0	432.0	444.0
4	236.5	284.8	319.3	337.0	415.4	452.5
5	253.1	295.6	314.5	345.0	452.5	464.5
Mean	241.7	287.4	315.1	340.0	428.3	446.9
S.D.	7.38	5.72	3.68	7.35	14.84	12.01
Cylinder Sample No.	Curing Time (Day)					
	7	14	21	28	90	120
1	172.5	238.1	257.0	297.9	374.9	402.0
2	198.7	212.4	255.6	286.0	376.2	425.5
3	180.8	220.0	260.0	291.0	370.0	410.0
4	195.0	225.0	265.0	300.0	365.0	405.0
5	190.0	224.7	248.0	272.0	350.0	412.6
Mean	187.4	224.0	257.1	289.4	367.2	411.0
S.D.	10.7	9.37	6.24	11.2	10.59	9.09
Coring Sample No.	Curing Time (Day)					
	7	14	21	28	90	120
1	142.7	169.8	191.0	246.8	269.7	270.7
2	145.0	170.0	195.0	255.0	263.0	280.0
3	149.0	174.0	207.0	243.0	259.0	285.0
4	141.7	175.1	213.0	242.3	251.9	294.2
5	157.2	171.0	193.9	248.1	256.5	271.4
Mean	147.1	172.0	200.0	247.0	260.0	280.3
S.D.	6.30	2.42	9.50	5.08	6.74	9.83



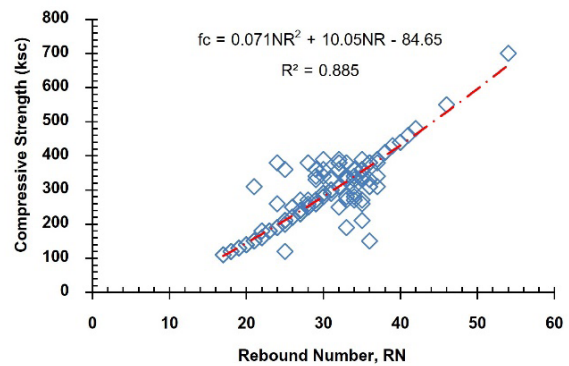
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุการบ่ม

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดประลัยกับอายุการบ่มพบว่า ในช่วงต้นของอายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน การพัฒนากำลังเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วโดยมีค่ามากกว่า 60% ของกำลังรับแรงอัดประลัยออกแบบที่อายุการบ่ม 28 วัน และสามารถพัฒนากำลังสูงขึ้นได้อีกเมื่อเพิ่มอายุการบ่ม ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณโพรงระหว่างอนุภาคในโครงสร้างเพสช่วงอายุการบ่มต้น (7วัน) จะมีอยู่มาก ปริมาณเอทริงไทต์ (Ettringite) ที่เกิดขึ้นรอบอนุภาคซีเมนต์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางเคมีลักษณะคล้ายเข็มยาวจากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังไม่สามารถขยายตัวเข้าสู่โพรงได้อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น (28วัน) เอทริงไทต์เกิดการขยายตัวเข้าสู่โพรงเพิ่มมากขึ้นในรูปของปูนซีเมนต์เจลทำให้โครงสร้างภายในของเพสมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและเกิดเป็นสารเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงอัด [17-21] โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดประลัยจากการทดสอบแบบทำลายกับอายุการบ่มมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการลอการิทึม (Logarithm Equation) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.986, 0.976 และ 0.895 สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกระบอกจากการเจาะแก่นตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดประลัยโดยวิธีแบบไม่ทำลาย (NDT) ในรูปค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 5 พื้นที่ในแต่ละช่วงอายุการบ่มดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4 พบว่ากำลังรับแรงอัดประลัยจากการประเมินค่าการสะท้อน (RN) ของเครื่องมือค้อนกระแทกแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดพัฒนาสูงขึ้น



รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดไม่แบบทำลาย (NDT)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าการสะท้อน

เมื่อเพิ่มอายุการบ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 199.0 ksc ถึง 367.2 ksc ที่อายุการบ่ม 7 ถึง 120 วัน จากการศึกษาของ Zoldners, Kolek และ Victor ในปี 1957, 1958 และ 1963 พบว่าการพัฒนาความแข็งของพื้นผิวคอนกรีตจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่ออายุการบ่มครบ 7 วัน ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดประลัยโดยการประเมินจากค่าการสะท้อนด้วย Schmidt's hammer จะให้ค่าที่ค่อนข้างสูง [22-24] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและการเจาะแก่น โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยมีค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบแบบทำลาย โดยผลการทดสอบทั้งหมดสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4 รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกับค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการแปลผลด้วยแผนภาพที่นำเสนอโดยผู้ผลิตเครื่องมือจำนวน 480 จุด (5พื้นที่ทดสอบ x 16 จุดยิ่ง x ทุกอายุการบ่ม) จากข้อมูลพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าว

อยู่ในช่วงค่าการสะท้อน 17–54 ($17 \leq RN \leq 54$) โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 110 ksc–700 ksc ($110ksc \leq fc \leq 700ksc$) เท่ากับ 0.885 ด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการพหุนาม (Polynomial Equation) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น

ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ทำลาย (ksc)

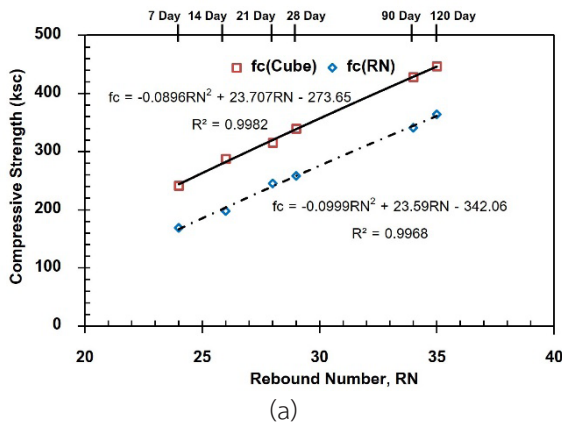
Area	Curing Time (Day)											
	7		14		21		28		90		120	
	RN	fc	RN	fc	RN	fc	RN	fc	RN	fc	RN	fc
1	25	212.2	26	224.4	29	273.0	29	273.0	34	350.9	34	350.9
2	24	199.0	26	224.4	28	255.0	30	285.6	34	350.9	36	383.5
3	24	199.0	26	224.4	28	255.0	29	273.0	35	367.2	35	367.2
4	24	199.0	26	244.1	28	255.0	29	273.0	35	367.2	34	350.9
5	23	183.6	27	240.0	27	240.0	30	285.6	35	367.2	35	367.2
Mean	24	199.0	26	244.1	28	255.0	29	273.0	34	350.9	35	367.2
S.D.	0.75	10.1	0.45	7.0	0.62	11.7	0.71	6.9	0.60	8.9	0.67	13.6

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยจากการทดสอบแบบทำลายด้วยก้อนตัวอย่างที่แตกต่างกันเทียบเคียงกับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยการประเมินจากค่าการสะท้อน (RN) จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยกับค่าสะท้อนมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการพหุนาม โดยที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นมากกว่า 0.98 ในทุกกรณี ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ และทรงกระบอกให้ค่าที่สูงกว่าการประเมินด้วยค่าการสะท้อน 24 % และ 9% โดยประมาณตามลำดับ (รูปที่ 9 (a) และ (b)) ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างแบบเจาะแกนให้ค่าที่ต่ำกว่า 20% โดยประมาณ (รูปที่ 9 (C)) ทัวไปแล้วการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตด้วยค่าการสะท้อนจากคอนกรีตเท่ากับโครงสร้างจริงนั้นจะมีความแม่นยำที่ระดับ $\pm 25\%$ จากค่ากำลังพิสูจน์ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาข้างต้น ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากกระบวนการทำงานภาคสนาม ในขณะที่การ

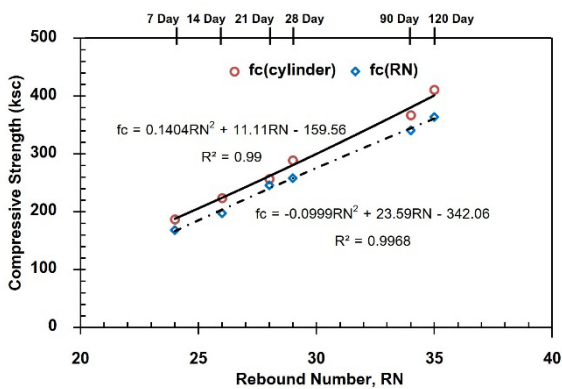
ทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยก้อนตัวอย่างจะมีความแม่นยำที่ระดับ $\pm 15-20\%$ นอกจากนี้ยังพบการรายงานผลการศึกษาในอดีตว่า การประเมินค่ากำลังด้วยคอนกรีตเทกองอาจให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงได้ถึง 50% [25-27]

ในทางปฏิบัติแล้วการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยด้วยวิธีคอนกรีตเทกองผู้ใช้งานมักแปลผลจากข้อมูลที่น่าเสนอโดยผู้ผลิตเครื่องมือ (Manufacturer Manual) ซึ่งในความเป็นจริงมักพบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากค่ากำลังพิสูจน์ไม่มากนักน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากปัจจัยด้านวัสดุที่มีความแตกต่างจากสภาพการใช้งานจริง ในความเป็นจริงแล้วหากต้องการให้เกิดความสอดคล้องกับการใช้งานจำเป็นต้องสอบเทียบเครื่องมือ (Calibration) เพื่อปรับแก้ข้อมูลในการแปลผลกับก้อนตัวอย่างด้วยส่วนผสมที่ใช้ งานจริงในห้องปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตามการดำเนินการเช่นนี้ยังพบว่าผลที่ได้มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ผลการศึกษาจากนักวิชาการหลายท่านจึงให้ข้อคิดเห็นว่าการปรับแก้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อน (RN) กับค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (fc') ควรกระทำกับชิ้นโครงสร้างจริงซึ่งในบางกรณีอาจต้องยืนยันผลด้วยการทดสอบแบบทำลายด้วยวิธีการเจาะ

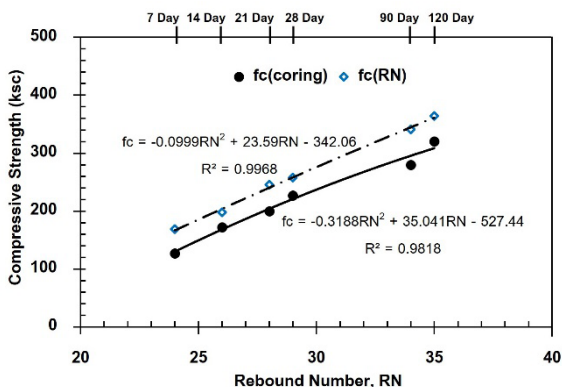
แก่กันควบคู่เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ และไม่ควรวีธีการนี้ประเมินค่ากำลังของโครงสร้างคอนกรีตเก่าที่มีอายุมาก(หลายปี)เนื่องจากมักจะให้ค่าที่สูงเกินจริง [28-32]



(a)



(b)



(c)

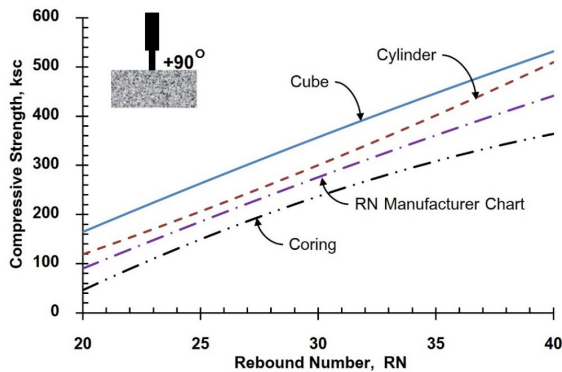
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบแบบทำลายแบบไม่ทำลาย

จากการพิจารณาข้อมูลผลการศึกษาพบว่าสามารถคาดคะเนค่ากำลังรับแรงอัดประลัยจากการเจาะแก่นในช่วงอายุการบ่ม 7 ถึง 120 วันในรูปค่าสะท้อนคูณด้วยตัวประกอบปรับแก้ (Correction Factor, α) ดังแสดงในสมการที่ 1 เมื่อ α มีค่าอยู่ในช่วง 0.75-0.88

$$F_c (\text{Coring}) = \alpha \cdot RN \quad (1)$$

โดยสมการที่ 1 นี้มีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่ไม่สามารถเจาะแก่นได้ทั้งนี้อาจเพราะมีความเสี่ยงต่อความเสียหายของโครงสร้าง การใช้งานสมการที่ 1 ทำได้โดยการทดสอบด้วยวิธีค้อนกระแทกตามขั้นตอนปกติ เมื่อได้ผลการทดสอบที่อยู่ในรูปของ Rebound Number จึงนำไปแปลผลด้วยแผนภาพที่นำเสนอโดยผู้ผลิตเครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 3 ก็จะทราบค่ากำลังรับแรงอัดประลัย จากนั้นนำค่าที่ได้คูณด้วยตัวประกอบปรับแก้ในช่วง 0.75 ถึง 0.88 ก็จะสามารถประมาณค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของก้อนตัวอย่างเจาะแก่นได้โดยไม่ต้องเจาะจริง หรืออาจกล่าวได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดประลัยจากการเจาะแก่นจะมีค่าในช่วง 75%-88% ของการแปลผลจาก RN เท่านั้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดประลัยโดยวิธีค้อนกระแทกให้ค่าสูงเกินจริง เมื่อนำค่าที่ได้จากการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยตามสมการที่ 1 ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในรายการประกอบแบบก็จะทำให้วิศวกรสามารถตัดสินใจในการคงไว้หรือรื้อถอนโครงสร้างนั้นๆได้

นอกจากนั้นเมื่อนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบแบบทำลายและไม่ทำลายดังแสดงในรูปที่ 9 แทนค่า RN ในช่วง 20-40 ซึ่งเป็นค่าจากการทดสอบกับโครงสร้างจริงภาคสนามสำหรับงานวิจัยนี้จะสามารถสร้างแผนภาพเพื่อใช้คาดคะเนค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกระบอกจากการเจาะแก่นได้ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าการสะท้อน

ผลการศึกษาในบทความฉบับนี้เกิดจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ใช้น้ำในการออกแบบเท่ากับ 240 ksc ในกรณีที่ใช้กำลังรับแรงอัดที่ใช้ในการออกแบบมีค่าที่แตกต่างออกไป ผู้วิจัยมีความเห็นว่าแนวโน้มของผลการทดสอบด้วยระเบียบวิธีการดำเนินงานเดียวกันกับงานวิจัยฉบับนี้จะมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ในกรณีที่ไม่มีการเกิดผลจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ชนิดของซีเมนต์และมวลรวมในส่วนผสม ตำแหน่งทดสอบ ความเรียบของพื้นผิวทดสอบ ขนาด รูปร่าง และความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ อายุการบ่ม ความชื้นในคอนกรีต [5,12-14] การทดสอบในกรณีที่ใช้กำลังรับแรงอัดที่ใช้ในการออกแบบมีค่าสูงกว่าเท่ากับ 240 ksc ผลการทดสอบจะมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน แต่ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบทั้งแบบทำลายและไม่ทำลายซึ่งอยู่ในรูปของค่า NR จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาที่สั้นกว่า ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ทำให้เอทริงไคต์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันขยายตัวเข้าสู่โพรงเพิ่มมากขึ้นเกิดเป็นสารเชื่อมประสานขึ้นในระดับที่สูงกว่านั่นเอง [17-21]

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดโดยวิธีการทดสอบแบบทำลายกับแบบไม่ทำลายโดยวิธีคอนกรีตแบบสมมติสามารถสรุปการศึกษาได้เป็นประเด็นต่างๆดังต่อไปนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบจากการทดสอบแบบทำลายของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกระบอกจากการเจาะแกนสามารถพัฒนาค่ากำลังได้ตามที่ออกแบบไว้ (f_c') \geq 240 ksc) โดยช่วงต้นของอายุการบ่มการพัฒนา กำลังเกิดขึ้น

ได้อย่างรวดเร็วในช่วงอายุการบ่ม 7 วันโดยมีค่ามากกว่า 60% ของกำลังรับแรงอัดที่ออกแบบที่อายุการบ่ม 28 วัน และสามารถพัฒนาค่ากำลังสูงขึ้นได้อีกโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 340 ksc, 289 ksc และ 247 ksc และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นครบ 120 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบกับอายุการบ่มมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการลอการิทึม (Logarithm Equation) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.986, 0.976 และ 0.895 ตามลำดับ

2. ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบโดยวิธีแบบไม่ทำลายมีค่าอยู่ในช่วง 199.0 ksc ถึง 367.2 ksc ที่อายุการบ่ม 7 ถึง 120 วัน โดยการพัฒนาความแข็งแรงของพื้นผิวคอนกรีตจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่ออายุการบ่มครบ 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบช่วงต้นมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบทำลาย (ทรงกระบอกและทรงกระบอกจากการเจาะแกน) ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบกับค่าสะท้อนมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการพหุนามโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.885

3. ค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบก่อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ และทรงกระบอกให้ค่าที่สูงกว่าการประเมินด้วยค่าการสะท้อน 24 % และ 9% ตามลำดับ ในขณะที่การทดสอบก่อนตัวอย่างทรงกระบอกจากการเจาะแกนให้ค่าที่ต่ำกว่า 20% โดยประมาณ ผลการทดสอบแบบทำลายกับแบบไม่ทำลายมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการพหุนามโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นมีค่ามากกว่า 0.98 ในทุกกรณี

4. สามารถคาดคะเนค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบจากการเจาะแกนโดยใช้ตัวประกอบปรับแก้ค่าการสะท้อนดังแสดงในสมการที่ 1 โดยผลจากการศึกษาสามารถสร้างแผนภาพเพื่อใช้คาดคะเนค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกระบอกจากการเจาะแกน จากค่าการสะท้อน (RN) ได้ดังแสดงในรูปที่ 10

5. ข้อเสนอแนะ

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่มีส่วนผสมแบบปกติ (Ordinary Concrete) แต่ในสถานการณ์ปัจจุบันวิทยาการด้านคอนกรีตได้มีพัฒนาอย่างมาก ควรมีการศึกษาในคอนกรีตชนิดพิเศษแบบต่างๆเช่น คอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารทดแทนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ

วัสดุหมุนเวียนใช้ใหม่ (Recycle Materials) และคอนกรีตที่มี ส่วนผสมของเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์สำหรับงาน โครงสร้างบางประเภท เนื่องจากคอนกรีตลักษณะพิเศษเหล่านี้ มีแนวโน้มในการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธา นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ที่สนับสนุนการดำเนินงานครั้งนี้ ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

1. British Standards Committee, 2002, BS EN 12390-3 Testing Hardened Concrete – Part 3 : Compressive Strength of Test Specimens, UK.
2. American Society for Testing and Materials, 2002, “ASTM C39/C39M-01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA.
3. American Society for Testing and Materials, 2002, “ASTM C42/C42M-99 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drill Cores and Sawed Beams of Concrete,” Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA.
4. Khumprungdej, S., Sirisawat, I. and Suklueng, P., 2007, “Compressive Strength of Reinforced Concrete in Core,” *Proceeding of Sripatum University Conference*, Bangkok, Thailand. pp. 90-95. (In Thai)
5. Department of Public Work and Town and County Planning, 2008, “Standard Test Method for Reinforced Concrete Structure with Non Destructive Test,” Standard of Department of Public Work and Town and County Planning, DPT.1501-51 to DPT.1507-

51, Bangkok, Thailand. (In Thai)

6. Hertz, H., 1881, “About the Contact of Elastic Solid Bodies (Über die Berührung fester elastischer Körper),” *Journal Furdie Reine und Angewandte Math Ematik*, 1881/5, pp. 12-23.
7. Fischer-Cripps, A.C., 2000, *Introduction to Contact Mechanics*, Springer, New York, p. 151.
8. Sinthaworn, S., 2017, “Investigation of the Rebound Number and Compressive Strength of Concrete with Quarry Dust as Fine Aggregate,” *MATEC Web of Conference 130*, June 24-25, Toyama city, Japan, pp. 1-3.
9. Bui, Q.B., 2017, “Assessing the Rebound Hammer Test for Rammed Earth Material,” *Sustainability*, 9 (10), pp. 1-10.
10. Domingo, R. and Hirose, S., 2009, “Correlation Between Concrete Strength and Combined Nondestructive Test for Concrete Using High-Early Strength Cement,” *Proceeding of the 6th Regional Symposium on Infrastructure Development*, Bangkok, Thailand. pp. 1-6.
11. Rokouzzaman, Md., Hossain, Md.B., Mostazid, Mdi. and Haque, Md.R., 2017, “Application of Rebound Hammer Method for Estimating Compressive Strength of Bricks,” *Journal of Civil Engineering Research*, 7 (3), pp. 99-104.
12. Sinthaworn, S., 2010, “Assessment of Strength of Concrete by Rebounded Hammer,” *SWU Engineering Journal*, 5 (2), pp. 43-49.
13. Hannachi, S. and Guetteche, M.N., 2014, “Review of the Rebound Hammer Method Estimating Concrete Compressive Strength on Site,” *Proceeding of International Conference on Architecture and Civil Engineering (ICAACE'14)*, Dubai, UAE. pp. 118-127.
14. Bungey, J.H., Millard, S.G. and Grantham, M.G., 2006, *Testing of Concrete in Structure*, 4th ed., Taylor

and Francis Group, New York.

15. American Society for Testing and Materials., 2002, "ASTM C143/C143M-00 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA.

16. Department of Public Work and Town and County Planning., 2008, "Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete," Standard of Department of Public Work and Town & County Planning, DPT.1210-50, Bangkok, Thailand. (In Thai)

17. Young, J.F. and Tong, H.S., 1977, "Microstructure and Strength Development of Beta-Dicalcium Silicate Paste with and without Admixtures," *Cement and Concrete Research*, 7 (6), pp. 627-636.

18. Sukontasukkul, P., 2013, Concrete, Pathumthani, Thailand. (In Thai)

19. Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C., 2006, Cement Pozzolan and Concrete, 3th ed., Khonkaen University, Thailand. (In Thai)

20. Chindaprasirt, P., 2006, Fly Ash in Concrete, 3th ed., Khon Kaen University, Thailand. (In Thai)

21. Chatveera, B. and Homsriprasert, W., 2011, "Behavior of Cement Plaste Blended Pozzolan Material in the Application of Microwave Energy," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (3), pp. 299-315. (In Thai)

22. Kolek, J., 1958, "An Appreciation of the Schmidt Rebound Hammer," *Magazine of Concrete Research*, 10 (28), pp. 27-36.

23. Zoldner, N.G., 1957, "Calibration and Use of Impact Test Hammer," *ACI Journal*, 54 (2), p. 161.

24. Victor, D.J., 1963, "Evaluation of Hardened Filed Concrete with Rebound Hammer," *Indian Concrete Journal*, 37 (11), p. 407

25. Testing Concrete British Standards Institution, 1986, BS 1881 : Part 202 Recommendation for Surface

Hardness Testing by Rebound Hammer, UK.

26. Hamidian, M., Ali Shariati, M. M., Khanouki, A. Sinaei, H. Togholi, A. and Nouri, K., 2012, " Application of Schmidt Rebound Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity Techniques for Structural Health Monitoring," *Scientific Research and Essays*, 7 (21), pp. 1998-2010.

27. Wutthiyon, W., Sumleerangkul, S. and Srinil, S., 2005, "Comparing Concrete Compressive Strength by Using Ultrasonic Pulse Velocity, Schmidth Hammer and Destructive Testing," *Proceeding of the 10th Nation Convention on Civil Engineering Conference*, Chonburi, Thailand. pp. 198-202. (In Thai)

28. Aydin, F. and Saribiyik M., 2010, "Correlation between Schmidt Hammer and Destructive Compressions Testing for Concrete in Existing Buildings," *Scientific Research and Essays*, 5 (13), pp. 1644-1648.

29. Gehlot, T., Sankhla, S.S. and Gupta, A., 2016, "Study of Concrete Quality Assessment of Structure Element Using Rebound Hammer Test," *American Journal of Engineering Research*, 5 (8), pp. 192-198.

30. Sanchez, K. and Tarranza, N., 2014, "Reliability of Rebound Hammer Test in Concrete Compressive Strength Estimation," *International Journal of Advances in Agriculture and Environmental Engineering*, 1 (2), pp. 198-202.

31. Hannachi, S. and Guetteche, M.N., 2014, "Re-view of the Rebound Hammer Method Estimating Concrete Compressive Strength on Site," *Proceeding of International Conference on Architecture and Civil Engineering (ICAACE'14), Dubai*, United Arab Emirates, pp. 118-127.

32. Puttala, S. and Homwuttiwong, S., 2017, Effect of Concrete Age on the Compressive Strength Tested by Rebound Hammer," *Proceeding of the 13th Mahasarakham University Conference*, Mahasarakham, Thailand. pp. 1-8. (In Thai)