

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อพารามิเตอร์การแตกหัก
ของคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบมีรอยบาก
EFFECTS OF W/C RATIOS ON FRACTURE PARAMETERS OF
RECYCLED AGGREGATE CONCRETE NOTCHED-BEAMS

ยอชชาย สิปันดร¹, กำธรเกียรติ มุสิเกต², สุธี ปิยะพิพัฒน์³ และ พงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา⁴

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-
ราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110,

yodchai.s@mail.rmutt.ac.th,

^{2,3}อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110,

²kamtorngiat.m@en.rmutt.ac.th, ³suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁴อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี, 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110,

pongpitch@rmutt.ac.th

Yodchai Sripundon¹, Kamtorngiat Musiket², Suthee Piyaphipan³ and Pongpitch Tuenpusa⁴

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University
of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1, Klong 6, Khlong Luang, Pathum Thani 12110 Thailand,

yodchai.s@mail.rmutt.ac.th

^{2,3}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi, 39 Moo 1, Klong 6, Khlong Luang, Pathum Thani 12110 Thailand,

²kamtorngiat.m@en.rmutt.ac.th, ³suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁴Lecturer, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala
University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1, Klong 6, Khlong Luang, Pathum Thani

12110 Thailand, pongpitch@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีผลต่อพารามิเตอร์การแตกหักของคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบปกติในอัตราส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ,0.60 และ

0.65 ตามลำดับ มีการปรับปรุงคุณภาพมวลรวมหยาบรีไซเคิลให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนการนำไปใช้ ขึ้นตัวอย่างมีอายุการบ่มที่ 28 วัน การทดสอบกำลังอัดประลัยและกำลังแรงดึงประลัยใช้ตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลรูปทรงกระบอกเพื่อหาคุณสมบัติทางกลพื้นฐาน ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดประลัยและแรงดึงประลัยมีค่าแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลซึ่งมีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคานมีลักษณะและรูปทรงที่คล้ายคลึงกันจำนวน 3 ขนาดที่แตกต่างกัน ถูกใช้ในการทดสอบแรงกดแบบ 3 จุด เพื่อหาแรงกดสูงสุดซึ่งจะใช้สำหรับหาค่าคุณสมบัติการแตกหักโดย Size-Effect Method ต่อไป ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าพารามิเตอร์การแตกหักได้แก่ตัวประกอบความเข้มข้นของหน่วยแรงและอัตราการปลดปล่อยพลังงานการแตกหักมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความเปราะกลับพบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: มวลรวมหยาบรีไซเคิล คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล ตัวประกอบความเข้มข้นของหน่วยแรง อัตราการปลดปล่อยพลังงานการแตกหัก ตัวเลขความเปราะ

ABSTRACT

This research presents the effects of water-to-cement ratios on the fracture parameters of Recycled Aggregate Concrete (RAC) of which 50% of natural coarse aggregate was replaced by Recycled Aggregate (RA). Designed water-to-cement ratios were 0.55, 0.60 and 0.65 respectively. Saturated surface-dry was applied to improve quality of RA. The specimens were cured at least 28 days prior to the experiments. The compressive and tensile strength tests were carried out using cylindrical specimens. The results showed that the compressive and tensile strength decreased with the corresponding trend from other researchers. Meanwhile, three different sizes of geometric similarity notched recycled aggregate concrete specimens were tested for their fracture properties. Three-point bending tests were performed to obtain the maximum transverse load which will be used to calculate fracture parameters using the Size-Effect Method. The results showed that with the increasing of water-to-cement ratios, fracture parameters such as stress intensity factor, fracture energy release rate and fracture process zone length tend to decrease. Inversely, the brittleness numbers were found to be increased.

KEYWORDS: Recycled Aggregate (RA), Recycled Aggregate Concrete (RAC), Stress Intensity Factor (SIF), Fracture energy release rate, Brittleness number

1. บทนำ

ผลกระทบจากปัญหาสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ-ลานีญาและสภาวะโลกร้อน ซึ่งส่งผลให้มนุษย์ต้องประสบภัยธรรมชาติสร้างความสูญเสียให้กับชีวิตและทรัพย์สินอย่างมากมายมหาศาล ทำให้มนุษย์ต้องตระหนักและช่วยกันคิดที่จะพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ ที่จะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือที่รู้จักกันดีในชื่อเทคโนโลยีสีเขียว (Green Technology)

คอนกรีต ได้ถูกค้นคิดและถูกนำมาใช้อย่างต่อเนื่องและยาวนานในการพัฒนา โครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructures) มากที่สุดในปัจจุบันด้วยเหตุผลหลายอย่าง ข้อดีที่สำคัญที่สุดคือเรื่องของราคาและความคงทนเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ณ วันนี้ ปริมาณคอนกรีตที่ถูกหรือถอน ทบทิ้ง ทำลาย เพื่อต้องการก่อสร้างใหม่หรือการขยาย ปรับปรุง โครงการเก่าๆ มีจำนวนมากตามไปด้วย ตั้งแต่อดีต การกำจัดเศษซากคอนกรีตเก่าเหล่านั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น นำไปถมพื้นที่ รวมไปถึงมีแนวความคิดที่พยายามนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเรียกว่า คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete, RAC) ซึ่งจะสามารถช่วยลดปัญหาการขาดแคลนมวลรวมหยาบในอนาคต ลด CO_2 ที่เกิดตามมาจากการขนส่งวัสดุ ลดมลพิษทางดินจากการนำซากคอนกรีตไปถมพื้นที่ ปลุกจิตสำนึกที่มีการหมุนเวียนนำขยะกลับมาใช้ใหม่ และใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้คุ้มค่า

ที่ผ่านมา คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้มีการศึกษาวิจัยโดยกลุ่มนักวิจัยในต่างประเทศหลายกลุ่มด้วยกัน โดยศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เป็นมวลรวมหยาบ [1] แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของมวลรวมรีไซเคิลนั้นจะต่ำกว่ามวลรวมปกติเนื่องจากมีซีเมนต์เพสต์เกาะยึดเกาะติดกับผิวมวลรวม ในขณะที่ Li et al [2] ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลยังขึ้นอยู่กับปริมาณในการใช้แทนที่มวลรวมหยาบปกติ ในกรณีที่ใช้ปริมาณการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 30 จะไม่ส่งผลต่อกำลังอัดอย่างชัดเจน นอกจากนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตเดิมอีกด้วย Hansen and Narud [3] ได้ศึกษาความหนาแน่นของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตเดิมเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับการย่อยหรือการบดอีกด้วย เนื่องจากถ้ามวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กจะทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความหนาแน่นต่ำลงไปด้วย ในขณะที่ Musiket et al [4] ได้ศึกษาอัตราความเร็วของแรงที่ใช้ทดสอบที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้พารามิเตอร์ของการแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าลดลงกว่าการทดสอบด้วยอัตราความเร็วคงที่เป็นต้น

สำหรับการศึกษาวิจัยเรื่องคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในประเทศไทยนั้น กลับพบว่ามีความไม่มากเท่าที่ควร งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นลักษณะของการศึกษาคุณสมบัติทางกลเบื้องต้นของคอนกรีตรีไซเคิล Mardnork [5] ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในสภาพแห้งในอากาศจะลดลงมากกว่าในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง Supharee [6] ได้

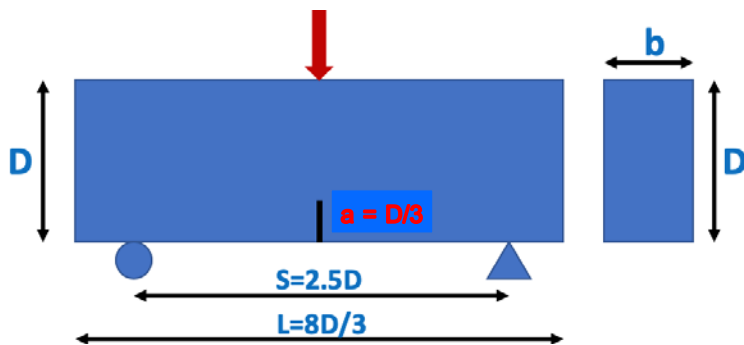
ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังอัดมีค่าที่ลดลง และ Saisut [7] ได้ศึกษากำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีต มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากเศษเส้าเข็มพบว่า มีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 30 และ 33 ตามลำดับ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะศึกษาการนำมวลรวมหยาบจากเศษซากอาคารเก่ามาใช้งานใหม่อีกครั้ง โดยการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิล และศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล รวมทั้งพารามิเตอร์การแตกหัก (Fracture Parameters) โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate, RA) แทนที่มวลรวมหยาบปกติในอัตราส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนักซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่า [2] และมีความเป็นไปได้สำหรับการใช้จริงในอนาคต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratios) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 0.55, 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ เพื่อป้องกันปัญหาเรื่องความสามารถในการเท้นเนื่องมาจากการดูดซึมน้ำที่มากของมวลรวมหยาบรีไซเคิล จุดมุ่งหมายในอนาคตคือการพัฒนาคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลให้สามารถนำไปสู่การใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างรองทั่วๆ ไป เช่น ลานจอดรถ พื้นทางเท้า เป็นต้น ได้อย่างปลอดภัยและคงทน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลโดยตรงต่อกำลังของคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะใช้งาน ยกตัวอย่างเช่นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อายุการพัฒนากำลังของคอนกรีต เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบภายในเนื้อของคอนกรีตซึ่งอาจทำให้เกิดโพรง ฟองอากาศ และเกิดรอยร้าว (cracks) ซึ่งกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics) ศึกษา พฤติกรรมของวัสดุที่มีความไม่สมบูรณ์ เช่น ตำหนิ (defect) หรือรอยร้าวต่างๆ เมื่อโครงสร้างนั้นอยู่ในสภาวะใช้งานเป็นเวลานานๆ จะมีการเติบโตหรือแพร่กระจายของรอบบริเวณปลายของรอยร้าว (Crack tip) จนสามารถพัฒนาไปสู่ความไม่มีเสถียรภาพของโครงสร้างและเกิดการวิบัติได้ในที่สุด [8]

พารามิเตอร์ของการแตกหักซึ่งเป็นพารามิเตอร์ขั้นพื้นฐานที่จะทำให้ทราบถึงความทนทานต่อการแตกหัก (Fracture toughness) ของคอนกรีตแต่พารามิเตอร์ของการแตกหักของคอนกรีตนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยพื้นฐานภายนอกต่างๆ และยังรวมถึงภายในส่วนที่เป็นคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเอง ในขณะที่ Size-Effect Method [8] เป็นการหาค่าพารามิเตอร์การแตกหักที่ใช้การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุด (Ultimate load) ของคานตัวอย่างที่มีรอยบาก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคานแบบแรงกด 3 จุด (Three-point Bending Test) ดังแสดงในรูปที่ 1 รูปแบบของการวิบัติลักษณะนี้จะเป็นการวิบัติในแบบหรือลักษณะที่ 1 ที่เรียกว่า Opening Mode โดยที่ผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าว



รูปที่ 1 การทดสอบแบบแรงกด 3 จุด

ผลจากการทดสอบของแรงกดสูงสุดของคานตัวอย่างสามารถคำนวณหาค่าความแข็งแรงในรูปหน่วยแรงระบุ (Nominal stress) ได้ตามสมการที่ 1 ซึ่ง C_N เป็นค่าสัมประสิทธิ์คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะรองรับฐานรองกับมิติความสูงของคาน (Span-to-depth ratio) โดยที่ P_U คือ แรงกดสูงสุด b คือความกว้างของคานและ D คือ ความสูงของคานตามลำดับ

$$\sigma_N = \frac{C_N P_U}{bD} \quad (1)$$

สมการพื้นฐานของ Size-Effect นั้น ได้ถูกเสนอโดย Bazant and Planas [9] ดังแสดงในสมการที่ 2 โดย B และ D_0 คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง ส่วน f'_t คือกำลังรับแรงดึงประลัยของคอนกรีต

$$\sigma_N = \frac{B f'_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (2)$$

ค่าพารามิเตอร์ของการแตกหักโดยอาศัยหลักการของ Size-effect Method ดังกล่าวนั้น เพื่อให้สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้อย่างสะดวกซึ่งจะทำการเปลี่ยนสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปที่ง่ายและใช้งานได้สะดวกกว่าสมการเดิม ทั้งนี้โดยการนำสมการที่ 2 มาจัดรูปเสียใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ 3

$$Y = AX + C \quad (3)$$

โดยปกติแล้ว ค่า ส.ป.ส. ต่างๆ ในสมการที่ 3 นั้น ได้มาจากการทำ curve fitting อันเนื่องมาจากการกระจายกระจายของข้อมูลที่มีความแตกต่างกันในเรื่องขนาดของคานตัวอย่างที่ใช้

ในการทดสอบ เมื่อทราบค่าดังกล่าวแล้ว ก็สามารถคำนวณหาค่าคงที่ในสมการที่ 2 โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$Y = (f'_t/\sigma_N)^2, X = D \quad (4)$$

$$B = 1/\sqrt{C}, D_0 = C/A \quad (5)$$

เมื่อทราบค่าคงที่ B และ D_0 จากสมการที่ 2 แล้วก็ทำให้สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์การแตกหักต่างๆ ได้โดยใช้สมการที่ 6 ถึง 8 ตามลำดับ โดยที่ K_{Ic} คือตัวประกอบความเข้มข้นของหน่วยแรง (Stress intensity factor) G_f คือ พลังงานการแตกหัก (Fracture energy) c_f คือ ความยาวประสิทธิผลบริเวณรอบการแตกหัก (Fracture process zone length) และ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity) ตามลำดับ

$$K_{Ic} = \frac{Bf'_t}{C_N} \sqrt{D_0 g(\alpha_0)} \quad (6)$$

$$G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (7)$$

$$c_f = \frac{D_0 g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \quad (8)$$

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เมื่ออัตราส่วนความยาวของฐานรองรับกับความสูงของคาน (Span-to-Depth ratio) มีค่าเท่ากับ 2.5 และอัตราส่วนรอยบากต่อความสูงคาน (Notched-to-Depth ratio) เท่ากับ 0.33 นั้น ค่าของตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (Geometric factor) $g(\alpha_0)$ มีค่าเท่ากับ 14.20 และ $g'(\alpha_0)$ คือค่าอนุพันธ์ลำดับหนึ่งของตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 72.71

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ที่ใช้ในส่วนผสมเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15 [10]

3.1.2 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ที่ใช้ทรายแม่น้ำ (River sand) ตาม มาตรฐาน ASTM C33 [11]

3.1.3 น้ำ ต้องมีความสะอาด เช่นน้ำประปา ไม่มีสิ่งเจือปนปราศจากกรด ต่าง น้ำมัน และ อินทรีย์สารอื่นๆ

3.1.4 มวลรวมหยาบปกติ (Natural aggregate) มาจากหินธรรมชาติตามมาตรฐาน ASTM C294 [12] ซึ่งร่อนผ่านตะแกรงตะแกรงเบอร์ 3/4 และ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งขนาดโตสุดคือ 20 มิลลิเมตร

3.1.5 มวลรวมหยาบรีไซเคิล ที่นำมาใช้ได้มาจากซากคอนกรีตเก่า โดยผ่านการย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยแรงงานคนก่อน แล้วจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว และค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่ง มีขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเท่ากับ 20 มิลลิเมตร

3.2 ส่วนผสมคอนกรีตตัวอย่าง

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตรีไซเคิล (Mixed design) สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ออกแบบให้มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ ต่อ น้ำ ต่อทราย ต่อมวลรวมหยาบ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ปริมาณส่วนผสมดังกล่าวสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดไว้แล้วนั้น แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)

อัตราส่วนน้ำ ต่อซีเมนต์	ซีเมนต์	น้ำ	ทรายหยาบ	มวลรวม หยาบ	มวลรวมหยาบ รีไซเคิล
0.55	340.7	187.4	832.0	520.0	520.0
0.60	330.0	198.0	832.0	520.0	520.0
0.65	320.0	208.0	832.0	520.0	520.0

3.3 การเตรียมมวลรวมหยาบรีไซเคิล

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีเศษซีเมนต์ที่ยังหลงเหลือ (residual cement) อยู่จากการย่อยคอนกรีตที่ใช้แล้วเกาะอยู่บริเวณโดยรอบผิวมวลรวม [2] ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะส่งผลให้มีความต้องการน้ำสูงกว่ามวลรวมหยาบแบบปกติในการทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างมวลรวมของซีเมนต์เฟสค์ ดังนั้นก่อนการใช้งานจึงจำเป็นต้องนำไปล้างน้ำให้สะอาดแล้วแช่น้ำทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากนั้น จึงนำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ก่อนนำไปหล่อตัวอย่างทดสอบต่อไป



รูปที่ 2 มวลรวมหยาบรีไซเคิล



รูปที่ 3 การทำความสะอาดก่อนใช้งาน

4. การทดสอบตัวอย่าง

4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มีอายุการบ่มน้ำที่ 28 วันจำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมทั้ง 9 ตัวอย่าง ถูกหล่อขึ้นมาสำหรับการทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยก่อนการทดสอบแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกดังกล่าว จะถูกนำไปเคลือบบริเวณพื้นผิวทั้งด้านบนและด้านล่างให้มีความสม่ำเสมอด้วยกัมมะถันเพื่อป้องกันหน่วยแรงขุมนุ่มที่อาจเกิดขึ้นและทำให้เกิดการกระจายตัวของแรงอัดตลอดพื้นที่ผิวในระหว่างการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4 ค่าของแรงอัดประลัยสามารถคำนวณได้ด้วยความสัมพันธ์ $f'_c = P/A$ เมื่อคือ A คือ พื้นที่หน้าตัด และ P คือ แรงกดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4 ตัวอย่างที่เคลือบผิวแล้ว

4.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

งานวิจัยครั้งนี้ จะทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมด้วยวิธี Brazilian Test ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่างเหมือนในกรณีของการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงประลัยเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 โดยที่ L คือ ความยาวของตัวอย่าง P คือ แรงกดสูงสุดและ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตตัวอย่าง



รูปที่ 5 การทดสอบ Brazilian Test

$$f_t' = \frac{2P}{\pi LD} \quad (9)$$

4.3 การทดสอบแรงกดแบบ 3 จุด

การหาพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตไร้เซลไชนงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานของ Size-Effect Method ดังที่ได้แสดงไว้ด้วยสมการข้างต้น ตัวอย่างคานคอนกรีตไร้เซลไชนที่มีรอยบากบริเวณ

กึ่งกลางคาน (Notched Beams) ซึ่งมีรูปทรงเหมือนกันและมีขนาดเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน (Geometrical Similarity) จำนวน 3 ขนาด เล็ก กลาง และใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยในแต่ละขนาดจะใช้ตัวอย่างคานจำนวน 3 ตัวอย่างตามขนาดที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับแต่ละอัตราส่วนน้ำตอซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่มีความแม่นยำสูง คานคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ทั้งหมดมีจำนวน 27 ตัวอย่าง ที่อายุบ่มน้ำที่ 28 วัน ผลจากการทดสอบจะได้แรงกดสูงสุด ต่อจากนั้นใช้วิธี Size-Effect Method เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์การแตกหักตามสมการที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น



รูปที่ 6 คานคอนกรีตรีไซเคิลทั้ง 3 ขนาด

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอย่างสำหรับการทดสอบรับแรงกดแบบ 3 จุด (เซนติเมตร)

ขนาดคาน	กว้าง	ยาว	สูง	ระยะฐานรองรับ	ระยะรอยบาก
ขนาดเล็ก	6.0	20.0	7.5	18.75	2.5
ขนาดกลาง	6.0	40.0	15.0	37.50	5.0
ขนาดใหญ่	6.0	80.0	30.0	75.50	10.0

5. ผลการทดสอบ

ตัวอย่างรูปทรงกระบอกและตัวอย่างคานที่มีรอยบากตรงกึ่งกลางคานจำนวน 2 ชุด ถูกใช้สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ตัวอย่างชุดแรกจะใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลพื้นฐานของคอนกรีต ในขณะที่ตัวอย่างชุดที่สองใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์การแตกหัก ซึ่งผลของการทดสอบสรุปได้ดังต่อไปนี้

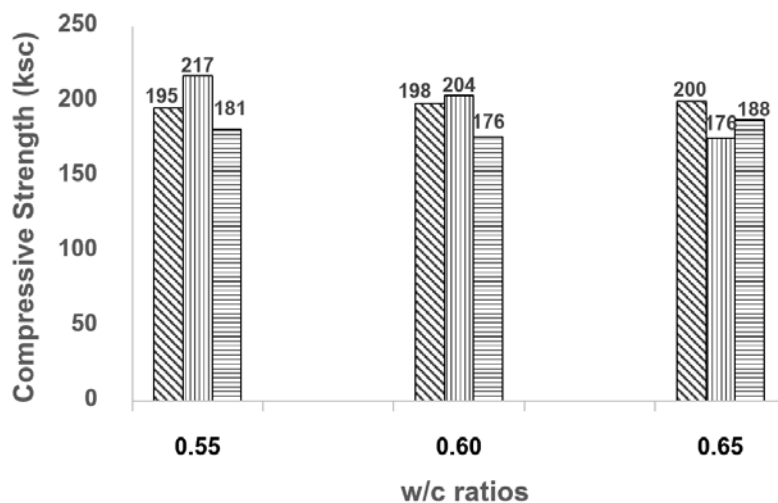
5.1 กำลังรับแรงอัด

จากการสังเกตพบว่าตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีลักษณะของการวิบัติในลักษณะของ cone shape ดังรูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรีไซเคิล แสดงไว้ในรูปที่ 8 สำหรับอัตราส่วนน้ำตอซีเมนต์ 0.55, 0.60 และ 0.65 ให้ค่าทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยใกล้เคียงกับ

198, 193 และ 188 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดประลัยเฉลี่ยลดลงร้อยละ 2.52 และ 2.59 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์มีจำนวนลดลง ทำให้การยึดเหนี่ยวและเชื่อมประสานช่องว่างและอุดรูพรุนระหว่างมวลรวมมีจำนวนไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้การรับกำลังอัดประลัยลดลง



รูปที่ 7 การวิบัติของแท่งตัวอย่าง



รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรีไซเคิล

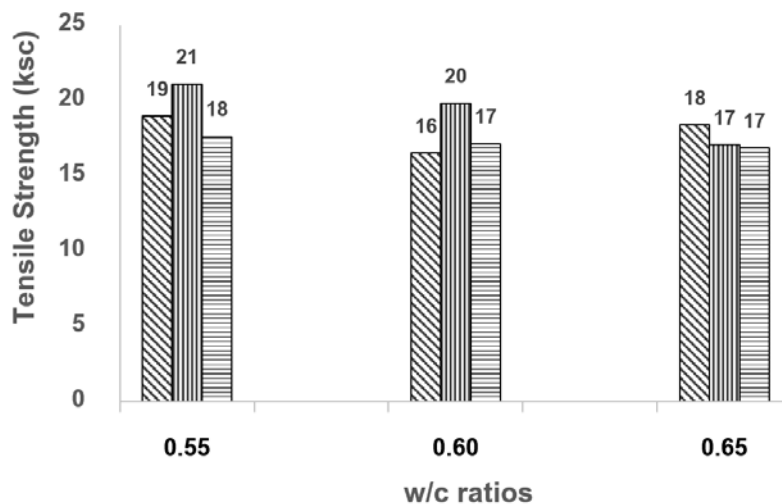
5.2 กำลังรับแรงดึง

เมื่อเพิ่มน้ำหนักระหว่างทำอย่างต่อเนื้อในอัตราคงที่ คอนกรีตจะเกิดการวิบัติในที่สุด พบว่าตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะเกิดการแตกร้าวจากจุดที่รับแรงกดส่งผ่านตลอดความหนาของตัวอย่างไปจนถึงปลายอีกด้านของฐานรองรับดังรูปที่ 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของ

คอนกรีตรีไซเคิลแสดงไว้ในรูปที่ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55, 0.60 และ 0.65 พบว่า แรงดึงประลัยเฉื่อย มีค่าเท่ากับ 19.2, 17.8 และ 17.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่า กำลังรับแรงดึงประลัยเฉื่อยของตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัดประลัยโดยมีค่าลดลงร้อยละ 7.29 และ 2.24 ตามลำดับ



รูปที่ 9 การวิบัติแบบผ่าซีกของคอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 10 กำลังรับแรงดึงประลัย

5.3 พารามิเตอร์การแตกหัก

ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดต่างกัน จำนวน 27 ตัวอย่าง จะถูกนำมาทดสอบด้วยวิธี Three point bending เพื่อหาค่าของแรงกดสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 11 จากการสังเกตพบว่า เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักจากเครื่องทดสอบอย่างต่อเนื่องในอัตราคงที่ ตัวอย่างคานคอนกรีตจะเริ่มมีการแตกร้าวจากปลายบนสุดของบริเวณรอยบาก แผ่กระจายผ่านขึ้นไปตลอดความลึกของคาน

จนกระทั่งถึงผิวบนสุดของตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลและเกิดการวิบัติในที่สุด ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลที่วิบัติแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 12 ลักษณะของการวิบัติรูปแบบดังกล่าวนี้ โดยพื้นฐานของกลศาสตร์การแตกหักแล้ว พบว่าเป็นการวิบัติในรูปแบบของโหมดที่ 1 ที่เรียกว่า Opening Mode นั่นเอง



รูปที่ 11 คานตัวอย่างก่อนการทดสอบ

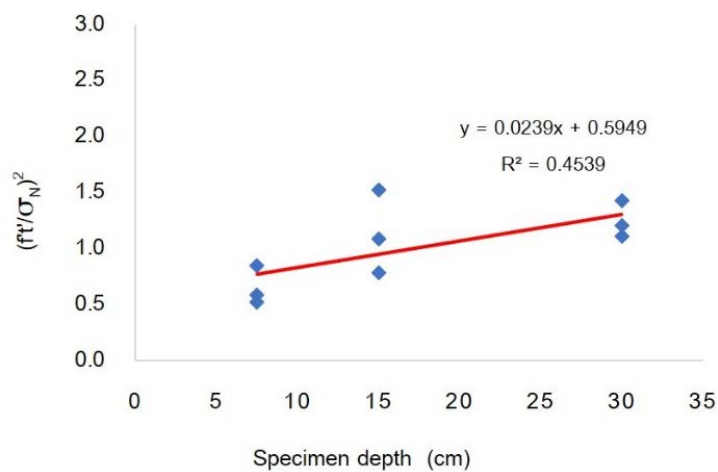


รูปที่ 12 คานตัวอย่างภายหลังจากการวิบัติ

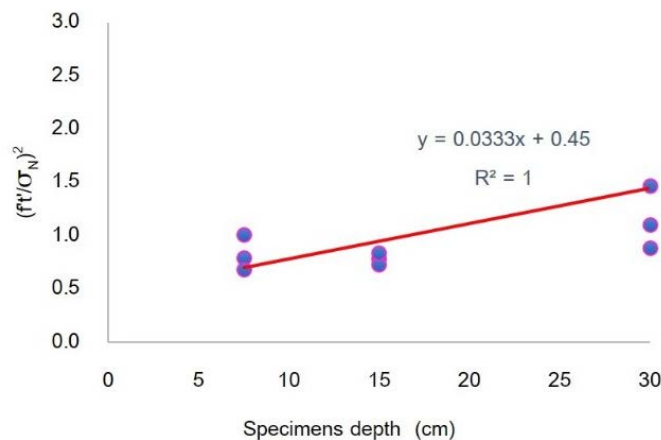
ผลของแรงกดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ สำหรับคาน 3 ขนาด ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 นั้น สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของคานทั้ง 3 ขนาดบนแกน X กับค่าของหน่วยแรงระบุบนแกน Y สำหรับแต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 13 ถึง 15 ตามลำดับ การหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสมการที่ 3 นั้น (ค่าของ A และ C) อาจพิจารณาได้จากการใช้ผลลัพธ์ของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation) ด้วยวิธี Linear regression กับรูปกราฟดังกล่าว (เส้นตรงในรูปที่ 13 ถึง 15) เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดของสมการเส้นตรงดังกล่าวแล้ว ก็สามารถทำการแปลงผลให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์การแตกหักหลักซึ่งใช้ในสมการของ Size-Effect Method ได้โดยอาศัยสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แรงกดสูงสุด (กิโลกรัม)

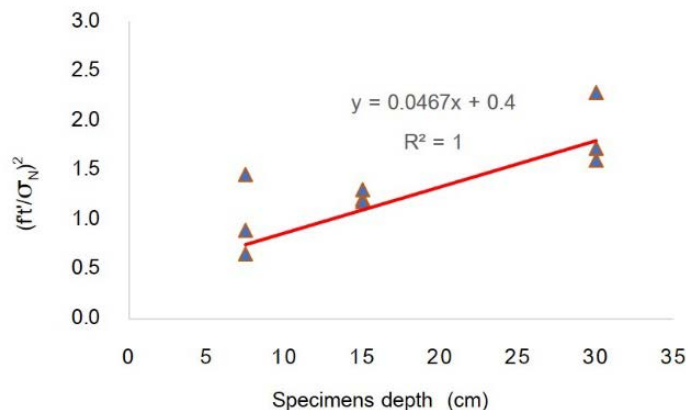
ขนาดตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์		
	0.55	0.60	0.65
ขนาดเล็ก-1	329	263	278
ขนาดเล็ก-2	258	233	187
ขนาดเล็ก-3	309	283	238
ขนาดกลาง-1	455	523	410
ขนาดกลาง-2	385	541	415
ขนาดกลาง-3	536	506	395
ขนาดใหญ่-1	901	764	597
ขนาดใหญ่-2	794	880	688
ขนาดใหญ่-3	865	984	713



รูปที่ 13 Linear regression w/c = 0.55



รูปที่ 14 Linear regression w/c = 0.60



รูปที่ 15 Linear regression w/c = 0.65

ภายหลังจากการแทนค่ากลับไปในสมการที่ 7 ถึง 8 จะทำให้สามารถคำนวณหา ค่าพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตไร้เซลที่ใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้โดยค่าดังกล่าว ได้ แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตไร้เซล

w/c ratios	$K_{Ic}(ksc)$	$G_f(ksc\sqrt{cm})$	$c_f(cm)$
0.55	128.70	0.08	4.86
0.60	107.38	0.05	2.64
0.65	87.42	0.04	1.67

ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของหน่วยแรง K_{Ic} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 128.70, 107.38 และ 87.42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่ค่าพลังงานของการแตกหัก G_f ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.08, 0.05 และ 0.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรรากที่สองของเซนติเมตร และมีค่าความยาวประสิทธิผลของบริเวณรอบการแตกหัก c_f เท่ากับ 4.86, 2.64 และ 1.67 เซนติเมตร สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น 0.55, 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีปริมาณสูงขึ้น ส่งผลต่อพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตรีไซเคิลอย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกันกับการที่กำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลนี้แปรผกผันกันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อันเนื่องมาจากน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น

5.4 ตัวเลขความเปราะ

ค่าตัวเลขที่แสดงถึงความเปราะของคอนกรีตตามวิธี Size-Effect Method นั้น สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 10 เมื่อ D คือความสูงของคานตัวอย่าง D_0 คือค่าคงที่จากสมการที่ 2 นั้นเอง

$$\beta = \frac{D}{D_0} \quad (10)$$

ตารางที่ 5 ค่าตัวเลขความเปราะ

ขนาดของคานตัวอย่าง	β		
	w/c ratios		
	0.55	0.60	0.65
D_1/D_0	0.301	0.555	0.876
D_2/D_0	0.603	1.110	1.751
D_3/D_0	1.205	2.220	3.503

จากตารางที่ 5 พบว่าค่าตัวเลขความเปราะของตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่คำนวณได้นั้น แปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกันกับพลังงานการแตกหักที่ปล่อยออกมาซึ่งมีค่าที่ลดลงตามลำดับนั้นเอง สำหรับกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่าเท่ากันนั้น พบว่าค่าตัวเลขของความเปราะที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับขนาดของคานคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากคานที่มีขนาดใหญ่มีจุดอ่อนแอกว่าคานขนาดเล็ก ซึ่งอาจเกิดขึ้นจาก โครงอากาศ รอยร้าวภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่เกิดจากการหดตัว

หรืออาจเกิดจากจุดอ่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ ค่าตัวเลขความเปราะทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ อยู่ในช่วง $0.1 < \beta < 10$ ซึ่งตาม Size-Effect Law [9] แล้วนั้น สามารถจัดได้ว่าเป็นวัสดุประเภทกึ่งเปราะ (Quasi-brittle) และจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของการแตกหักแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Fracture Mechanics) เพื่อศึกษาและอธิบายพฤติกรรมอื่นๆ ต่อไป

6. สรุปผล

งานวิจัยในครั้งนี้นำการศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55, 0.60 และ 0.65 ซึ่งมีผลต่อค่าพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตรีไซเคิลที่มีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้มาจากการแยกย่อยจากคอนกรีตเก่า มวลรวมหยาบที่แยกแล้วนี้ถูกนำมาผ่านขั้นตอนการทำ Pre-treatment ด้วยการทำให้ร้อนตัวผิวแห้งก่อนนำไปทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การแตกหักด้วยวิธี Size-Effect Method ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นถึงแม้จะส่งผลให้ความสามารถในการหล่อคอนกรีตตัวอย่างทำได้ง่ายขึ้นแต่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลงและส่งผลต่อเนื่องทำให้พารามิเตอร์การแตกหักอัน ได้แก่ Stress intensity factor K_{Ic} , Fracture energy rate G_f และ Fracture process zone length c_f ของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าลดลงไปร้อยละ 16.5, 37.5 และ 45.6 เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 0.6 และพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าลดลงไปร้อยละ 18.5, 20.0 และ 36.7 เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 0.65 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าตัวเลขของความเปราะ β แปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความแข็งแรงที่ลดลงของคอนกรีตรีไซเคิลตัวอย่าง

7. ข้อเสนอแนะ

ควรพิจารณาเรื่องการป้องกันการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่จะนำมาใช้สำหรับงานวิจัยในครั้งต่อไป การเลือกใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เหมาะสม จะช่วยให้สามารถลดปริมาณของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงมาในระดับที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการควบคุมปริมาณมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่จะไม่ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตรีไซเคิลต่ำเกินไป

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2562

References

- [1] Nagataki S, Iida K, Gokce A. A critical review on the use of recycled aggregate for concrete. Proceedings of the 5th International Symposium on Cement and Concrete (Volume 3); 2002 Oct 28-Nov 1; Shanghai, China. Shanghai: Tongji University Press; 2002. p. 3-12.
- [2] Li J, Xiao J, Huang J. Influence of recycled coarse aggregate replacement percentages on compressive strength of concrete. Jianzhu Cailiao Xuebao Journal of Building Materials 2006;9(3):297-301.
- [3] Hansen TC, Narud H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International 1983;5(1):79-83.
- [4] Musiket K, Rosendahl M, Xi Y. Fracture of recycled aggregate concrete under high loading rates. Journal of Materials in Civil Engineering 2016;28(6):04016018.
- [5] Mardnork A. Effect of moisture states and absorption of natural aggregates and recycled coarse aggregates on slump and compressive strength of concrete [thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2012. (In Thai)
- [6] Supharee N. Strength and permeability of concrete using recycled dam concrete aggregate as coarse aggregate [thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2014. (In Thai)
- [7] Saisut T. Recycled coarse aggregate by residual concrete piles. 9th National Research Conference; Kasetsart University, Kamphaeng San campus. Nakhon Pathom; 2012. (In Thai)
- [8] Kumar S, Barai SV. Concrete fracture models and applications: Springer Science & Business Media; 2011.
- [9] Bazant ZP, Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. New York: Routledge, 1998.
- [10] Thai Industrial Standards Institute (TISI). TIS 15 Part 1-2555. Portland cement - Part 1: specification. Bangkok: Ministry of Industry; 2014. (In Thai)
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM C33/C33M-18 Standard specification for concrete aggregates. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2018.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM C294-19 Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2019.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ยอชชาย สีสันดร นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ที่อยู่ 67 ม.13 ต.ทรายขาว อ.สอยดาว จ.จันทบุรี 22180 โทรศัพท์ 087-7806545, email: yodchai.s@mail.rmutt.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ความแข็งแรงและทนทานของคอนกรีต



ผศ. ดร.กำธรเกียรติ มุสิเกต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง University of Colorado at Boulder, CO, USA

ที่อยู่ 39 ม.1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 087-3808222, email: kamtornkiat.m@en.rmutt.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ความแข็งแรงและทนทานของคอนกรีต, การแตกหักของวัสดุ, การวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์, เทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับปัญหาของแข็ง, Finite Element Analysis, Smoothed Strain FEM, Extended FEM, Meshfree Methods, Scaled Boundary Finite Element Analysis



ผศ. สุธี ปิยะพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ที่อยู่ 39 ม.1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 088-8108335, email: suthee.p@en.rmutt.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ความแข็งแรงและทนทานของคอนกรีต, วัสดุปรับปรุงดิน, เสาคอนกรีต-ซีเมนต์ โครงสร้างคอนกรีตและเหล็ก, คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบทางวิศวกรรมโยธา



พงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา ภาควิชาวิศวกรรมจักรกลเกษตร คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำเร็จการศึกษา
ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี

ที่อยู่ 39 ม.1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-
5493082, email: pongpitch@rmutt.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ความแข็งแรงและทนทานของวัสดุ การปรับปรุงคุณภาพ
ดิน

Article History:

Received: September 27, 2019

Revised: December 24, 2019

Accepted: December 26, 2019