



อิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อพารามิเตอร์

การแตกหักของคอนกรีตที่นำมวลรวมหยาบกลับมาใช้ใหม่

INFLUENCE OF RECYCLED AGGREGATE CONTENT ON  
FRACTURE PARAMETERS OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

สมชาย กล้าวิกกรณ์<sup>1</sup>, กำธรเกียรติ์ มุสิกเกตุ<sup>2\*</sup>, สุธี ปิยะพิพัฒน์<sup>3</sup>, พงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา<sup>4</sup>

นักศึกษาปริญญาโท<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์<sup>2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อาจารย์<sup>4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

\*Corresponding author: kamtornkiat@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้มุ่งไปที่การศึกษาเฉพาะอิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate, RA) ต่อพารามิเตอร์การแตกหัก (Fracture parameters) ของคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled Aggregate Concrete, RAC) หรือคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลเพียงเท่านั้น แต่ผลของการวิจัย ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเบื้องต้นสำหรับการวิจัยคุณสมบัติการแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลในอนาคตของประเทศไทย ปริมาณมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้เป็นอัตราส่วนผสมร้อยละ 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบทั้งหมด ทำการปรับปรุงคุณภาพมวลรวมหยาบรีไซเคิลให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนการนำไปใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับ 0.6 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกล ในขณะที่ตัวอย่างคานคอนกรีตซึ่งมีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคาน (Notched beams) ซึ่งมีรูปทรงทางเรขาคณิตที่คล้ายคลึงกันจำนวน 3 ขนาดที่แตกต่างกัน ถูกใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การแตกหักโดยวิธี Size Effect ผลการศึกษาพบว่า ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (Stress intensity factor) ในโหมดที่ I ( $K_I$ ) และอัตราการปลดปล่อยพลังงานการแตกหัก (Fracture energy release rate) ( $G_f$ ) มีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่

**คำสำคัญ:** มวลรวมหยาบรีไซเคิล, คอนกรีตมวลรวมหยาบนำกลับมาใช้ใหม่, คานคอนกรีตรอยบาก, ตัวประกอบความเข้มข้นความเค้น, อัตราการปลดปล่อยพลังงานการแตกหัก, ค่าตัวเลขของความเปราะ

ABSTRACT

These research aims are not only to examine the influences of Recycled Coarse Aggregate (RA) replacement on fracture properties of Recycled Aggregate Concrete (RAC) but to fundamentally establish their results as an initial reference for further investigation in this field. Recycled aggregate replacement were 50%, 75% and 100% by weight. The simplest surface pre-treatment for RA was saturated surface dry to remove some dust and remaining particles. Water-to-Cement ratio was designed to be 0.6 for both

Somchai Klavikorn<sup>1</sup>, Kamtornkiat Musiket<sup>2\*</sup>, Suthee Piyapipat<sup>3</sup> and Pongpitch Tuanpusa<sup>4</sup>

<sup>2,3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

<sup>4</sup> Department of Agricultural Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*cylindrical and notched beam specimens. Cylindrical specimens were molded for mechanical properties experiment while notched RAC beams which three proportional different geometrical similarity sizes were used to determine fracture parameters based on Size Effect Method. The critical stress intensity factor and fracture energy release rate decreased with the increasing of the recycled aggregate replacements.*

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

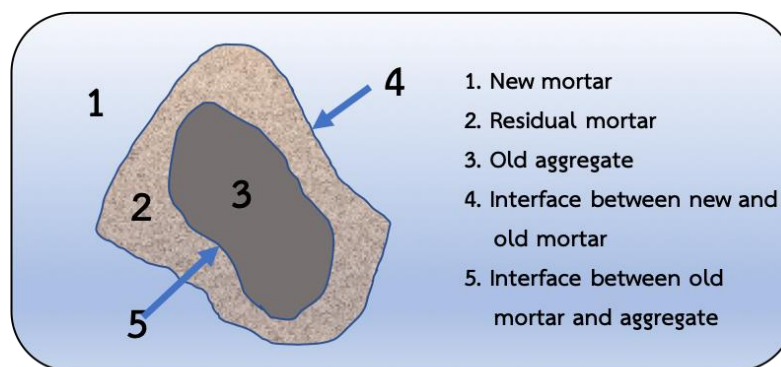
## 1. บทนำ

มีเหตุผลหลายประการที่จำเป็นต้องศึกษากลศาสตร์การแตกหักของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตจัดเป็นวัสดุประสานจำพวกซีเมนต์ (Cementitious) ซึ่งได้จากการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นซีเมนต์เพสต์ทำหน้าที่ยึดประสานระหว่างมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบและเคลือบเกาะผิวรวมตัวกันเป็นก้อนหลังจากแข็งตัว แต่ภายในซีเมนต์เพสต์จะมีช่องว่างและโพรงซึ่งเป็นผลก่อให้เกิดการหดตัว (shrinkage) การคืบ (creep) และอื่น ๆ ส่วนแต่เป็นปัจจัยต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ผลดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกร้าวหรือตำหนิ (defect) ซึ่งกลศาสตร์การแตกหักเป็นการศึกษาพฤติกรรมรอบ ๆ บริเวณปลายรอยร้าว เมื่อถูกแรงกระทำในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น แรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาเป็นต้น รอยร้าวหรือตำหนิดังกล่าว จะมีการแพร่กระจายของปลายรอยร้าวจนเกิดทำให้มีการเสียรูปอย่างมาก (large deformation) และเกิดการวิบัติได้ในที่สุด ข้อมูลของพารามิเตอร์ของกลศาสตร์การแตกหัก เช่น ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (Stress intensity factor) หรืออัตราการปลดปล่อยพลังงานการแตกหัก (Fracture Energy release rate) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์การแตกหักขั้นพื้นฐานที่จะทำให้ทราบถึงความทนทานต่อการแตกหักของคอนกรีตจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น แต่พารามิเตอร์ดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับปัจจัยพื้นฐานอื่น ๆ ได้แก่คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและขนาดของโครงสร้างอีกด้วย

เหตุผลสำคัญหลายประการที่สมควรจะนำคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้าง อันจะเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและยังก่อให้เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดอีกด้วย ช่วยลดพลังงานในการขนส่งวัสดุสำหรับผลิตคอนกรีตมายังสถานที่ก่อสร้าง ลดปัญหาฝุ่นละอองจากกระบวนการผลิตหิน ซึ่งส่งผลให้ช่วยลดปัญหาด้านมลพิษสิ่งแวดล้อมซึ่งกำลังเป็นปัญหาที่รุนแรงและคนทั่วโลกให้ความสำคัญ จากข้อมูลของการประกอบการอุตสาหกรรมการไม่หิน พบว่ามีความต้องการใช้หินในการก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี สืบเนื่องมาจากความเจริญทางด้านสังคมและเศรษฐกิจ อันจำเป็นต้องมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานขึ้นมารองรับให้มากที่สุด เช่น อาคารที่อยู่อาศัย ถนน ทางด่วนระหว่างเมือง รถไฟฟ้า โรงพยาบาล เป็นต้น มวลหยาบหยาบเป็นส่วนประกอบของคอนกรีตประมาณร้อยละ 75 โดยปริมาตร และเป็นที่มีความจำเป็นในการผลิตคอนกรีต เป็นเหตุให้ต้องทำลายทรัพยากรธรรมชาติเช่น ภูเขาและธรรมชาติ เพื่อให้ได้มาเป็นหินในปริมาณที่เพียงพอ

ปัจจุบันปริมาณซากคอนกรีตที่ได้มาจากการรื้อถอนอาคารและทุบทิ้งเพื่อต้องการก่อสร้างใหม่มีเป็นจำนวนมาก การกำจัดซากคอนกรีตดังกล่าวในปัจจุบัน ทำได้โดยการนำไปถมร่วมกับดินถมเพื่อปรับปรุงพื้นที่เก่า ซึ่งสามารถทำได้ในระดับหนึ่ง เช่น การนำไปถมบริเวณหนองน้ำและพื้นที่บริเวณน้ำท่วมขัง เป็นต้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดสำหรับการนำไปใช้ในหลายพื้นที่ เช่น บริเวณที่มีการก่อสร้างเสาเข็ม เป็นต้น วิธีที่มีประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่งสำหรับการกำจัดซากคอนกรีตเก่าเหล่านั้นคือการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเรียกว่าคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete, RAC) หรืออาจเรียกสั้น ๆ คอนกรีตรีไซเคิล (ในบทความฉบับนี้จะพิจารณาว่ามีความหมายเหมือนกัน) โดยมีขั้นตอนคือการนำซากคอนกรีตเก่ามาทำการบดย่อยให้มีขนาดที่เล็กลง เพื่อแยก

มวลรวมหยาบและซีเมนต์เฟสตัดออกจากกัน กรรมวิธีการแยกมวลรวมหยาบออกมาจากซากคอนกรีตเก่า นั้น สามารถทำได้ทั้งแยก  
ข่อยด้วยมือหรือเครื่องจักร มวลรวมหยาบที่ได้นี้ บางชิ้น อาจจะยังมีซีเมนต์เฟสของเก่าเกาะยึดอยู่โดยรอบพื้นผิวและสามารถ  
สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนดังแสดงด้วยหมายเลข 2 และ 3 ในรูปที่ 1 ปริมาณซีเมนต์เฟสที่เก่าที่เกาะอยู่โดยรอบมวลรวมหยาบนั้น  
ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำที่มากกว่าปกติ



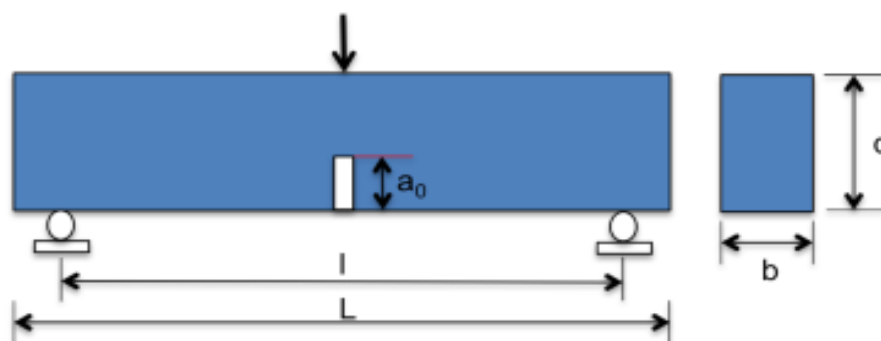
รูปที่ 1 ลักษณะตัวอย่างของมวลรวมหยาบรีไซเคิล

งานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมา นั้น ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตรีไซเคิล เช่น Saisut [1] ได้ศึกษา  
กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากเศษเสาเข็มเก่า พบว่า ค่าดังกล่าวลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ  
30 และ 33 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Euathitaporn [2] ซึ่งพบว่า กำลังอัดประลัยของ  
คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและเศษมวลเบเป็นวัสดุผสมรวม จะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตปกติเช่นเดียวกัน การที่มีซีเมนต์  
เก่าเหลือติดอยู่กับมวลรวมหยาบภายหลังการย่อยคอนกรีตเก่า ทำให้ปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตรีไซเคิลนั้นมีค่าสูง โดย  
ผลการศึกษาจาก 15 ตัวอย่างของ Ravindrarajah และคณะ [3] พบว่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่ามากกว่าค่าการ  
ดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบปกติประมาณร้อยละ 6.35 ขึ้นอยู่กับปริมาณในการใช้แทนที่มวลรวมหยาบปกติ ในกรณีที่ใช้ปริมาณ  
การแทนที่ไม่เกินร้อยละ 30 นั้น Hansen และคณะ [4] พบว่าไม่ส่งผลต่อกำลังอัดอย่างชัดเจน นอกจากนี้แล้ว ยังพบว่า ความ  
หนาแน่นของคอนกรีตรีไซเคิลนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตเดิมเพียงอย่างเดียวแต่การย่อยหรือการบดคอนกรีตเก่า ก็  
ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลเองด้วย เนื่องจากถ้ามวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กจะทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวม  
หยาบรีไซเคิลมีความหนาแน่นต่ำไปด้วย ปริมาณของมวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้น ยังส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตรีไซเคิล  
ด้วย Liu และคณะ [5] พบว่า การใช้ปริมาณมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ร้อยละ 100 นั้น ทำให้กำลังรับแรงดัดลดลงไปประมาณ ร้อยละ  
30 เทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบแบบปกติ

งานวิจัยในครั้งนี้ เกิดจากแนวความคิดที่จะศึกษาการนำมวลรวมหยาบจากเศษซากอาคารเก่ามาใช้งานใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดย  
ทำการศึกษาปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิล ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลรวมทั้งพารามิเตอร์การ  
แตกหัก (Fracture parameters) ของคอนกรีตรีไซเคิล(Recycled Aggregate Concrete, RAC) โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled  
Aggregate, RA) แทนที่มวลรวมหยาบปกติในอัตราส่วนผสมร้อยละ 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์  
(W/C ratio) ที่ใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 0.60

## 2. Size Effect Law

กลศาสตร์การแตกหักโดยวิธี Size Effect นั้น สามารถอธิบายพฤติกรรมของความเป็นวัสดุกึ่งเปราะ (Quasi-brittle) ของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วพารามิเตอร์การแตกหักที่ได้จากการทดลอง ยังสามารถบ่งบอกถึงความเหนียว (Ductility) หรือความเปราะ (Brittleness) ของคอนกรีตได้อย่างง่ายดายซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความปลอดภัยในการออกแบบโครงสร้างทั่วไป โดยค่าความเค้นระบุ (Nominal Strength) สามารถคำนวณได้จากค่าของแรงกดสูงสุด (Peak Load) ที่ได้จากการทดสอบคานตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบมีรอยบาก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคานด้วยวิธี Three-point Bending Test ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทดสอบแบบ Three-point-bending Test

สำหรับวิธีของ Size-Effect นั้น จะนำค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของคานตัวอย่างที่มีรอยบาก ณ กึ่งกลางคานที่ได้ มาคำนวณหาความเค้นระบุ (nominal stress) ตามสมการที่ (1)

$$\sigma_N = C_n \frac{P_u}{b * d} \quad (1)$$

เมื่อ  $\sigma_N$  คือความเค้นระบุ (ksc)  $C_N$  คือค่าคงที่  $P_u$  คือแรงกดสูงสุด (kg)  $b$  คือความหนาของคาน (cm) และ  $d$  คือความสูงของคาน (cm) สมการของการหาพารามิเตอร์การแตกหักสำหรับวิธี Size Effect นั้น ได้ถูกเสนอขึ้นโดย BAZANT และคณะ [6] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\sigma_N = \frac{B f_t'}{\sqrt{1 + d/D_0}} \quad (2)$$

เมื่อ  $B$  และ  $D_0$  คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบและ  $f_t'$  คือกำลังรับแรงดึงประลัยของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

หลังจากนั้น จึงนำค่าที่ได้จากสมการที่ 1 มาทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นระบุในแกน Y กับขนาดความสูงของคานตัวอย่างในแกน X ซึ่งปริมาณของข้อมูลในเรื่องขนาดความสูงของคานตัวอย่างที่มากกว่า จะส่งผลให้ข้อมูลที่ได้น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น แต่ด้วยเหตุผลข้อจำกัดในทางปฏิบัติ อันได้แก่ ขนาดของคานตัวอย่างซึ่งจะต้องเป็นอัตราส่วนที่เท่ากัน ข้อจำกัดใน

เรื่องขนาดของคานตัวอย่างที่ใหญ่ที่สุดที่จะทำการทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งคำแนะนำสำหรับจำนวนขนาดของคานตัวอย่างที่แตกต่างกันโดยวิธี Size Effect เป็นต้น การศึกษาในครั้งนี้ จึงใช้คานตัวอย่างจำนวน 3 ขนาด จากขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ตามลำดับ ข้อมูลความสัมพันธ์ทั้ง 3 ชุดนั้น โดยทั่วไปแล้ว จะมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลซึ่งยากต่อการนำไปแปลผลการหาสมการที่ใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลดังกล่าวนี้ อาจทำได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายและให้ผลที่ดี คือการประมาณค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวแบบภายใน (Interpolation) ด้วย Linear regression ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) ร่วมกับสมการที่ (4) เมื่อทราบค่าของสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของสมการที่ (3) รวมทั้งระยะตัดแกน Y ก็ทำให้สามารถทราบค่าของ  $D_0$  และ  $B$  ได้จากสมการที่ (5) ซึ่งในที่สุด ส่งผลให้ ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (Stress intensity factor,  $K_{Ic}$ ) ความยาวประสิทธิผลของบริเวณการแตกหัก (Effective fracture process zone length,  $C_f$ ) และค่าพลังงานของการแตกหัก (Fracture energy,  $G_f$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) - (8) ตามลำดับ

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

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

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

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

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

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

เมื่อ  $g(\alpha_0)$  คือฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) ของคานแบบมีรอยบาก ณ กึ่งกลางคาน  $g'(\alpha_0)$  คืออนุพันธ์ลำดับหนึ่งของฟังก์ชัน และ  $E_0$  คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elastic modulus) ที่ใช้ในการทดสอบ

### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 [7] น้ำเป็นสะอาด เช่นน้ำประปา ไม่มีสิ่งเจือปน มวลรวมละเอียด หาชื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป นำมาล้างเอาสิ่งเจือปนต่าง ๆ ก่อนการใช้ มวลรวมหยาบปกติ (Limestone) ได้มาจากหินธรรมชาติ นำมาล้างเอาสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกแล้วร่อนให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่นำมาใช้ ได้มาจากซากคอนกรีตเก่า ดังแสดงในรูปที่ 2 - 3 โดยผ่านการย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยแรงงานคน แล้วร่อนผ่านตะแกรง

เบอร์ 3/8 นิ้ว และให้ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลไม่ควรเกิน 20 มิลลิเมตร สอดคล้องกับขนาดความกว้างของคานตัวอย่าง



รูปที่ 3 ชากคอนกรีตเก่า



รูปที่ 4 มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ผ่านการบดย่อยแล้ว

### 3.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ทำการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต โดยออกแบบให้มีอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : น้ำ : ทราย : มวลรวมหยาบปกติ : มวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนผสมต่าง ๆ สำหรับเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้ แสดงได้ดังตารางที่ 1

### 3.3 การเตรียมมวลรวมหยาบรีไซเคิลก่อนใช้งาน

Brito และคณะ [8] ทำการรวบรวมงานวิจัยที่ได้ศึกษาหลายงานในอดีตพบว่า มีการรายงานว่าการปรับปรุงสภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิลก่อนการนำไปใช้งาน (Pre-treatment) นั้น จะทำให้คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ได้ มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

วัตถุประสงค์หลักของการปรับปรุงสภาพมวลรวมหยาบรีไซเคิล ก็เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบเก่า Supharee [9] พบว่าสถานะปกติของมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะส่งผลให้กำลังอัดต่ำกว่าสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ดังนั้น จำเป็นต้องมีกระบวนการปรับปรุงสภาพก่อนนำไปใช้งาน วิธีที่ง่าย เสียค่าใช้จ่ายน้อยและได้ผลดีที่สุดคือการล้างทำความสะอาดผิว โดยนำมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เตรียมไว้แช่น้ำเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง เนื่องจากน้ำที่ถูกกักอยู่ในช่องว่างในมวลรวมหยาบนั้นไม่ได้มีส่วนในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ เหมือนน้ำที่อยู่ผิว (Free Water)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล (ต่อลูกบาศก์เมตร)

| Replacement (%) | Cement (kg) | Water (kg) | Sand (kg) | NA (kg) | RA (%) |
|-----------------|-------------|------------|-----------|---------|--------|
| 50              | 330.0       | 198.0      | 832.0     | 520.0   | 520.0  |
| 75              | 330.0       | 198.0      | 832.0     | 260.0   | 780.0  |
| 100             | 330.0       | 198.0      | 832.0     | 0       | 1040   |

(NA = Natural aggregate, RA = Recycled aggregate)

### 3.4 การทดสอบตัวอย่าง

#### 3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

สำหรับการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดนั้น จะใช้ตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ที่อายุของการบ่มไม่น้อยกว่า 28 วัน จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละปริมาณเปอร์เซ็นต์มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้ รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่างก่อนที่จะทำการทดสอบนั้น แท่งตัวอย่างทั้งหมด ได้ทำการเคลือบผิวด้านบนและล่าง (capping) ด้วยกัมมะถัน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเค้นกดที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งเฉพาะที่มากเกินไป (stress concentration) อันจะส่งผลให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่เป็นจริง

#### 3.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ จะทำการทดสอบหาลำดับรับแรงดึงผ่าซีก ซึ่งเป็นการทดสอบแบบทางอ้อม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร มีความหนา 5 เซนติเมตร ที่อายุการบ่มไม่น้อยกว่า 28 วัน เช่นเดียวกับตัวอย่างของการรับแรงอัด จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิล รวมทั้งสิ้นจำนวน 9 ตัวอย่าง สมการที่ใช้ในการคำนวณสำหรับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของแท่งตัวอย่าง คือ

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

เมื่อ  $f_t'$  คือกำลังรับแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)  $L$  คือความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm) และ  $P$  คือแรงกดสูงสุดจากการทดสอบ (kg)

### 3.4.3 การทดสอบ Three-point Bending Test

ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลที่มีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคาน โดยมีอายุของการบ่มไม่น้อยกว่า 28 วัน จำนวนทั้งสิ้น 27 ตัวอย่าง (3 ขนาดคานตัวอย่าง  $\times$  3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์  $\times$  3 ตัวอย่าง) โดยมีรูปร่างและมิติของคานทั้ง 3 ขนาด แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยแสดง ความกว้างคาน ( $b$ ), ความยาวคาน ( $L$ ), ความลึกคาน ( $d$ ), ระยะฐานรองรับ ( $I$ ) และความยาวของรอยบาก ( $a_0$ ) สำหรับคานตัวอย่างทั้ง 3 ขนาด สำหรับรูปที่ 5 แสดงตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาดกลางที่มีรอยบาก ณ กึ่งกลาง ผลจากการทดสอบด้วย Three-point Bending Test จะได้ค่าของแรงกดสูงสุด จากนั้น จึงใช้สมการของ Size Effect เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ของการแตกหักตามสมการที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

ตารางที่ 2 ระยะต่าง ๆ ของตัวอย่างคานคอนกรีตทั้ง 3 ขนาด

| Size         | b   | L    | d    | I     | $a_0$ |
|--------------|-----|------|------|-------|-------|
| Small        | 6.0 | 20.0 | 7.5  | 18.75 | 2.5   |
| Intermediate | 6.0 | 40.0 | 15.0 | 37.50 | 5.0   |
| Large        | 6.0 | 80.0 | 30.0 | 75.00 | 10.0  |

(สัญลักษณ์ที่ใช้สอดคล้องกับรูปที่ 2 โดยมีหน่วยเป็นเซนติเมตร)



รูปที่ 5 ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลขนาดกลางที่มีรอยบาก

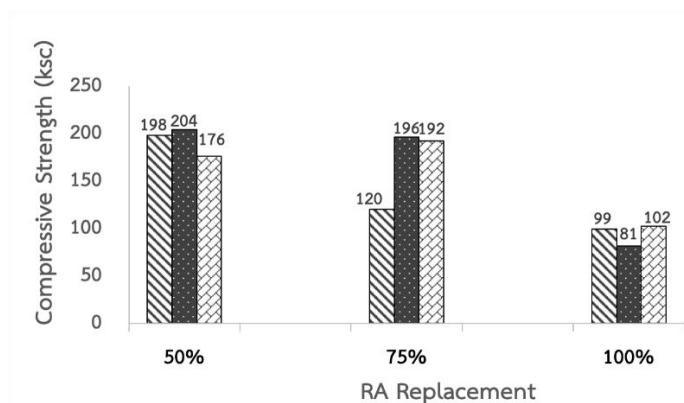
## 4. ผลการทดสอบ

คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลในครั้งนี้ ได้จากการนำมวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบปกติในอัตราร้อยละ 50, 75 และ 100 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.60 โดยตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะใช้ทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลพื้นฐาน ในขณะที่ตัวอย่างคานที่มีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคานนั้น ใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของการแตกหัก ผลการทดสอบที่ได้ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงกดสูงสุดของคานที่มีรอยบากตามลำดับ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

### 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลหลังจากการวิบัติพบว่า ส่วนใหญ่มีลักษณะของการวิบัติแบบ cone shape กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 50, 75 และ 100 ตามลำดับนั้น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 192.6, 169.3 และ 94 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6 (พลอตของกราฟแต่ละ

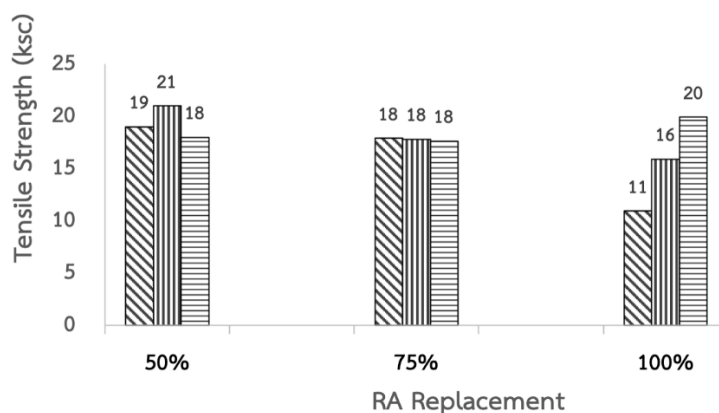
แท่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ) ซึ่งกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตริไซเคิลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์ใหม่กับมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ไม่เพียงพอ เพราะบริเวณผิวโดยรอบยังคงมีซีเมนต์เพสต์เดิมติดอยู่



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

#### 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength)

จากการสังเกต พบว่าตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะเกิดการแตกร้าวเป็นแนวเส้นตรงผ่านบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งคอนกรีตตัวอย่างจำนวน 9 ชิ้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 (ลดขนาดของกราฟแต่ละแท่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ) ผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50, 75, และ 100 ค่ากำลังรับดึงทางอ้อมเฉลี่ย มีค่าเป็น 19.3, 18 และ 15.6 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ กำลังรับแรงดึงของแท่งตัวอย่างคอนกรีตริไซเคิลมีแนวโน้มที่ลดลง ด้วยเหตุผลเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น



รูปที่ 7 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

#### 4.3 ผลการทดสอบ Three point Bending Test

ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลที่มีรอยบากกึ่งกลางคาน (Notched Beams) จำนวน 27 ตัวอย่าง ถูกทดสอบด้วยวิธีแรงกด 3 จุด (Three-point Bending Test) ตามกระบวนการของ Size Effect Method รูปที่ 8 แสดงการเตรียมคานคอนกรีตรีไซเคิลตัวอย่างขนาดกลางก่อนการทดสอบ คานตัวอย่างภายหลังการวิบัติแล้วได้แสดงไว้ในรูปที่ 9

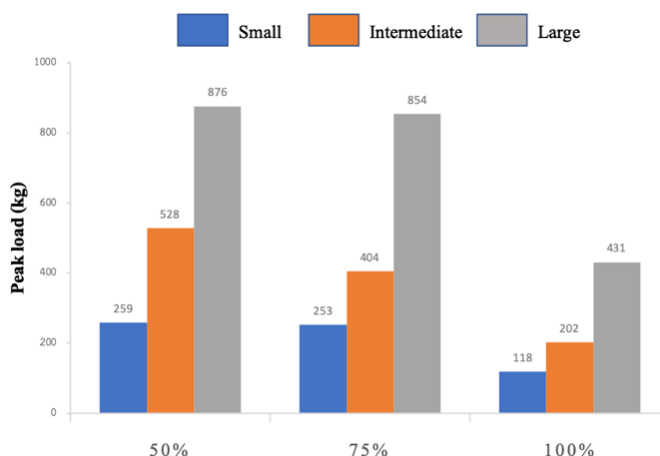
ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในคานตัวอย่างพบว่า มีแนวโน้มที่ลดลง ตามปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 10 แสดงค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของคานตัวอย่างจำนวน 27 ตัวอย่าง โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 259, 253 และ 118 kg สำหรับคานขนาดเล็ก มีค่าเฉลี่ยเป็น 528, 404 และ 202 kg สำหรับคานขนาดกลาง และมีค่าเฉลี่ยเป็น 876, 854 และ 431 kg สำหรับคานขนาดใหญ่ ตามอัตราส่วนของมวลรวมหยาบรีไซเคิล 50, 75 และ 100% ตามลำดับ



รูปที่ 8 การจัดเตรียม Three-point Bending Test



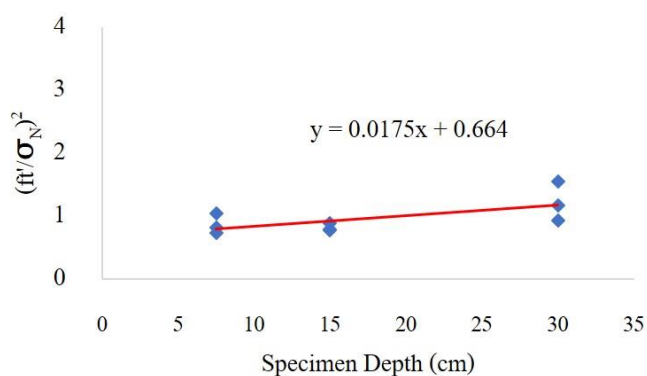
รูปที่ 9 คานตัวอย่างขนาดกลางหลังการวิบัติ



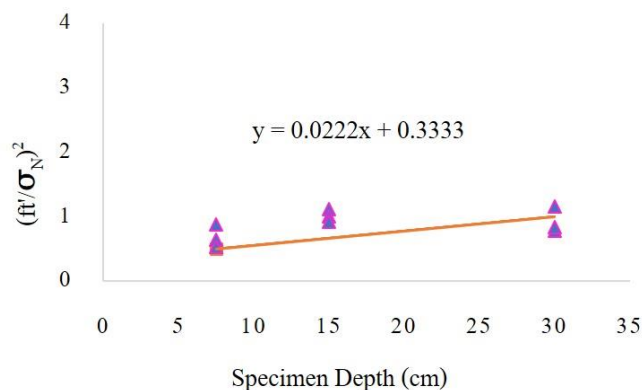
รูปที่ 10 แรงกดสูงสุดเฉลี่ยของคานตัวอย่างทั้ง 3 ขนาด

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์การแตกหัก (Fracture parameters analysis)

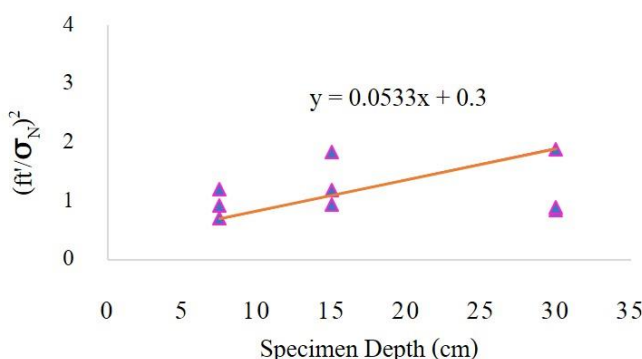
จากการทดสอบคานตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลมีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคาน แบบ Three point bending จะมีรูปแบบการวิบัติด้วยแรงดึงแบบโหมดที่ 1 ที่เรียกว่าแบบเปิด (opening mode) ซึ่งพบว่าลักษณะการวิบัติจะเริ่มแตกร้าวจากปลายบริเวณรอยบากและเกิดการการแตกร้าวอย่างรวดเร็วจนถึงขอบหลังคาน ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดของตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถคำนวณค่าความเค้นระบุได้ดังแสดงในตารางที่ 3 ค่าของความเค้นระบุดังกล่าว สามารถนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์กับขนาดความสูงของคานตัวอย่างที่ปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นทั้ง 3 ค่า แสดงได้ในรูปที่ 11-13 พร้อมทั้งแสดงสมการเส้นตรงที่ได้จากการทำ Linear regression ตามลำดับ



รูปที่ 11 กราฟการทำ Linear regression ของคานคอนกรีตรีไซเคิล 50%



รูปที่ 12 กราฟการทำ Linear regression ของคานคอนกรีตรีไซเคิล 75%



รูปที่ 13 กราฟการทำ Linear regression ของคานคอนกรีตรีไซเคิล 100 %

การคำนวณสำหรับค่าพารามิเตอร์การแตกหักต่าง ๆ จาก Size Effect Law [9] นั้น สามารถใช้สมการและวิธีการที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น ค่าพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตรีไซเคิลที่คำนวณได้นั้น แสดงสรุปไว้แล้วในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น ( $K_{Ic}$ ) พลังงานการแตกหัก ( $G_f$ ) และความยาวประสิทธิผลของบริเวณการแตกหัก ( $c_f$ ) มีแนวโน้มที่ลดลง อันสืบเนื่องมาจากปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์ใหม่กับซีเมนต์เพสต์เก่าลดลง

ตารางที่ 3 ผลของพารามิเตอร์การแตกหัก

| RA Replacement (%) | $K_{Ic}(ksc)$ | $G_f(ksc\sqrt{cm})$ | $c_f(cm)$ |
|--------------------|---------------|---------------------|-----------|
| 50                 | 141.75        | 0.09                | 7.31      |
| 75                 | 113.98        | 0.07                | 2.90      |
| 100                | 42.24         | 0.01                | 1.17      |

## 5. สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลในคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้ประโยชน์จริงจากการแทนที่มวลรวมหยาบปกติในอัตราที่มากกว่าร้อยละ 30 ไปจนถึงการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมด กำลังรับแรงกดและแรงดึงของคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้ มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของมวลรวมหยาบที่นำไปแทนที่ซึ่งเนื่องมาจากกำลังการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์ใหม่และมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ลดลง ในที่สุด ส่งผลต่อเนื่องให้พารามิเตอร์การแตกหักต่าง ๆ ของคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าลดลงทั้งหมด นอกจากนี้ ยังพบว่า การลดลงทั้งในเรื่องกำลังและพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับปริมาณการแทนที่ร้อยละ 50 และ 75 แต่จะมีผลชัดเจนเมื่อทำการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมด ค่าถามสำคัญสำหรับงานวิจัยต่อไปคงไม่ใช่เพียงแค่การศึกษาเพื่อหาปริมาณของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เหมาะสมสำหรับการนำคอนกรีตรีไซเคิลไปใช้ในทางปฏิบัติสำหรับประเทศไทยเท่านั้น แต่ยังต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตของความแข็งแรงทางกลและความทนทานต่อการแตกหักที่ยอมรับได้ควบคู่กันไปด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ วท. จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ประจำปี 2561

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Saisut, T. Recycled coarse aggregate by residual concrete piles. in *9th National Research Conference*. 2012. Kasetsart University, Kamangsans campus. Nakorn Pathom province. (Proceedings poster in Thai)
- [2] Euathitaporn, C., A study of ultimate compressive strength of concrete using concrete and lightweight brick wastes as aggregates, in *Civil Engineering*. 2012, Suranaree University of Technology. (Thesis in Thai)
- [3] Ravindrarajah, R. S., Y. Loo, and C. Tam, Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 1987. **39**(141): p. 214-220.
- [4] Hansen, T.C. and H. Narud, Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, 1983. **5**(1): p. 79-83.
- [5] Liu, Q., J. Xiao, and Z. Sun, Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement and Concrete Research*, 2011. **41**(10): p. 1050-1057.
- [6] BAZANT, ZP., K. T., Determination of Fracture Energy, Process Zone Length and Brittleness Number from Size Effect, with Application to Rock and concrete. *International Journal of Fracture*, 1990. **44**(2): p. 111-131.
- [7] Institute, T.I.S., *TIS 15 Part 1-2555 (2012)*, in *Portland cement Part 1 Specification*. 2014, Ministry of Industry. (Specification in Thai)
- [8] Brito, Jorge & Saikia, Dr. Nabajyoti., *Recycled aggregate in concrete: Use of industrial, construction and demolition waste.*, 2012, 10.1007/978-1-4471-4540-0.
- [9] Supharee, N., Strength and permeability of concrete using recycled dam concrete aggregate as coarse aggregate, in *Civil Engineering*. 2014, Suranaree University of Technology. (Thesis in Thai)
- [10] Bazant, Z.P., *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. 2019: Routledge.

