

การศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาด  
แทนที่มวลรวม

A STUDY MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE MIXED WITH  
CERAMIC FRAGMENTS TWO SIZE REPLACED IN AGGREGATE

สุรัชชัย อำนวยพรเลิศ<sup>1</sup>, พงศ์พันธ์ กาญจนการุณ<sup>2</sup> และ อนุวัฒน์ เสมอเชื้อ<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
เชียงใหม่ 99 หมู่ที่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงใหม่ 57120,  
<sup>1</sup>aretomrit@gmail.com

<sup>3</sup>นักศึกษา, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
เชียงใหม่ 99 หมู่ที่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงใหม่ 57120

Surachai Amnuaypornler<sup>1</sup>, Pongpan Kanjanakaroon<sup>2</sup> and Anuwat Samercher<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala  
University of Technology Lanna Chiang rai, 99 Moo 10, Sai Khao Subdistrict, Phan District,  
Chiang Rai 57120, Thailand, <sup>1</sup>aretomrit@gmail.com

<sup>3</sup>Bachelor student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala  
University of Technology Lanna Chiang rai, 99 Moo 10, Sai Khao Subdistrict, Phan District,  
Chiang Rai 57120, Thailand

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ทดสอบพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกประเภทภาชนะ  
เครื่องใช้จากโรงงานในจังหวัดพะเยา โดยการแทนที่เศษเซรามิกในมวลรวมละเอียดด้วยเศษ  
เซรามิกในอัตราส่วนผสมร้อยละ 2.5, 5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์และแทนที่มวลรวมหยาบอัตราส่วน  
ร้อยละ 5, 10 ของน้ำหนักมวลรวมละเอียด โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสม  
เศษเซรามิก โดยออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 210, 240, 280 ksc และทดสอบกำลังรับ  
แรงอัดที่อายุ 3, 7, 28 และ 56 วัน และทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า  
เศษเซรามิกที่นำมาผสมในคอนกรีตทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มเศษ  
เซรามิกแทนที่มวลรวมละเอียดมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมและ  
ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ เศษเซรามิกแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 2.5 และแทนที่มวลรวม  
หยาบร้อยละ 10 ซึ่งมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 103.43 และ

ค่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยของคานคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิกมีค่ามากกว่าตัวอย่างคานคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตคิดเป็นร้อยละ 113.15 ส่วนการศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงดึง แรงเฉือนและแรงบิดของคอนกรีตผสมเศษเซรามิก โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงจากแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด  $\varnothing 15.0 \times 30.0$  cm การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนจากคานตัวอย่างขนาด  $15.0 \times 15.0 \times 50.0$  cm และทดสอบกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงบิดจากคานตัวอย่างขนาด  $10.0 \times 10.0 \times 50.0$  cm โดยออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211-1 เท่ากับ 210, 240, 280 และ 320 ksc และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน จากการศึกษาพบว่าการนำเศษเซรามิกเข้ามาผสมในคอนกรีตทำให้กำลังรับแรงดึงผ่าซีก กำลังรับแรงดึงทางตรง กำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงบิดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้กำลังรับแรงดึงผ่าซีก แรงดึงทางตรงและแรงเฉือนสูงสุดคือ เศษเซรามิกแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 5 และเศษเซรามิกแทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 10 คิดเป็นร้อยละ 102.73, 127.26 และ 163.42 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับและอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้กำลังรับแรงบิดสูงสุดคือ เศษเซรามิกแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 5 และเศษเซรามิกแทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 5 คิดเป็นร้อยละ 120.02 ของคอนกรีตควบคุม

**คำสำคัญ:** พฤติกรรมทางกลของคอนกรีต, เศษเซรามิก 2 ขนาดแทนที่มวลรวม

### ABSTRACT

This research aimed to study the mechanical behavior of concrete mixed with fragments of ceramic ware factory in Phayao by replacing fine aggregate and coarse aggregate with ceramic fragments in a ratio of 2.5, 5 percent of cement weight and replacing coarse aggregates as 5, 10 percent of fine aggregates weight by comparing with the control concrete samples. This study tested the compressive strength at 3, 7, 28 and 56 days and flexural strength testing. The mixed concrete was designed as the 210, 240, 280 ksc. The study found that the ceramic fragments mixed in the concrete compressive strength were increased. At the same time, adding more fine aggregate of ceramic chip decreased the compressive strength. The optimum ratio that produced a maximum compressive strength was ceramic fragments instead of 2.5 percent of fine aggregate, and instead 10 percent of coarse aggregate, which had more compressive strength than controlled concrete, representing 103.43 percent. The average flexural strength of concrete beams mixed with, ceramic fragments was 113.15 percent more than the concrete examples of concrete mix design control ratio. And the study of the properties of tensile, torsion and shear strength on

concrete mixed with ceramic fragments and to compare the properties of tensile, torsion and shear strength on ceramic fragments mixed concrete with normal concrete through the tensile test of cylinder specimen with size of  $\varnothing 15.0 \times 30.0$  cm, the shear test of concrete beam specimen with size of  $15.0 \times 15.0 \times 50.0$  cm and the flexural strength and torsion test of concrete beam specimen with size of  $10.0 \times 10.0 \times 50.0$  cm. The mixed concrete is designed following ACI 211-1 standard at the compression equals to 210, 240, 280 and 320 ksc. At the age of 28 days. The findings show that mixing ceramic fragments in concrete increase splitting tensile, direct tensile, shear and torsion strength of concrete when comparing with controlled concrete. The optimal proportion for splitting tensile, direct tensile and maximum shear strength is the substitution of ceramic fragments for fine aggregate at 5 percent and for coarse aggregate at 10 percent as the percentage of 102.73, 127.26 and 163.42 of controlled concrete, respectively. In addition, the optimal proportion for maximum torsion strength is the substitution of ceramic fragments for fine aggregate at 5 percent and for coarse aggregate at 5 percent as the percentage of 120.02 of controlled concrete.

**KEYWORDS:** Mechanical Behavior, Ceramic Fragments Two Size Replaced in Aggregate

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย เป็นแหล่งสร้างอาชีพของคนในภูมิภาคเพื่อสร้างรายได้ให้กับเศรษฐกิจไทยและนำเงินตราเข้าประเทศจากการส่งออก แหล่งผลิตอุตสาหกรรมเซรามิกจากข้อมูลกระทรวงอุตสาหกรรมพบว่าจำนวนโรงงานผลิตเซรามิกที่เปิดดำเนินการทั่วประเทศมีทั้งหมดมากกว่า 530 โรงงาน ส่วนใหญ่ตั้งกระจายอยู่ในจังหวัดต่างๆ เช่น จังหวัดลำปาง เชียงใหม่ สระบุรี สมุทรสาคร เป็นต้น โดยเฉพาะโรงงานเซรามิกไทยในภาคเหนือมีจำนวนโรงงานอยู่ที่ 243 โรงงาน ซึ่งถือว่ามากที่สุดของประเทศไทย (ที่มา: โรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม) คิดเป็นร้อยละ 45.8 เพราะเหตุนี้จึงทำให้เซรามิกในภาคเหนือมีปริมาณการผลิตที่มากขึ้นทุกวันทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่างๆตามมา เช่น การข่ารดจากขั้นตอนการผลิตเซรามิก อันได้แก่ การแตกกร้าวในขั้นตอนการเผา การเคลือบสีผิดเพี้ยน การขึ้นรูปผิด ความข่ารดเสียหายของเซรามิกที่เกิดขึ้นสูงถึงร้อยละ 30 ของการผลิตรายวัน [1, 2] ทำให้ต้องมีการผลิตสินค้าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งเซรามิกที่ข่ารดไม่สามารถนำกลับมาใช้งานตามวัตถุประสงค์ของเซรามิกแต่ละชนิด ในขณะที่ของเหลือจากผลิตภัณฑ์มีปริมาณมากขึ้นกลายเป็นขยะอุตสาหกรรมก่อให้เกิดปัญหากับผู้ประกอบการในจัดเก็บหรือการทำลาย โดยทั่วไปแล้วทางโรงงานอุตสาหกรรมจะนำเซรามิกไปฝังกลบในพื้นที่ต่างๆ [3] เกิดเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดที่สูง

รวมถึงค่าขนส่งและในทางวิศวกรรมการที่นำเศษเซรามิกไปฝังกลบในพื้นที่ต่างๆหากอนาคตมีการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัยต่างๆทำให้เกิดการหลุดตัวของอาคารและบริเวณโดยรอบ เพราะเศษเซรามิกมีปริมาณช่องว่างที่มากจึงมีข้อจำกัดการนำไปฝังกลบพื้นที่ หากกระบวนการจัดการไม่มีประสิทธิภาพย่อมส่งผลให้เกิดปัญหาด้านทรัพย์สินและสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกทำมาจากดินขาว (kaolinite) ที่เผาในอุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ทำให้เซรามิกมีความแข็งแรงทนต่อการสึกกร่อนมีความแข็งแรงสูงและยังสามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีจากงานวิจัยที่ผ่านมามีผู้สนใจศึกษานำเศษเซรามิกมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิกแทนที่ของมวลรวมหยาบสามารถรับกำลังได้ [4] และยังมีกรนำเศษกระเบื้องเซรามิกมาบดละเอียดผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และทดสอบพฤติกรรมทางกลของคอนกรีต [5] แต่ในขณะที่เดียวกันยังไม่มีการศึกษาทางงานวิจัยโดยการนำเศษเซรามิกมาแทนที่ของมวลรวมหยาบควบคู่กับแทนที่มวลรวมละเอียดและศึกษาค่าการสูญเสียความสามารถเท่าได้

ดังนั้นทางผู้ศึกษาวิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษานำเศษเซรามิกเข้ามาปรับปรุงใช้ในงานคอนกรีตโดยการนำเศษเซรามิกเข้ามาแทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดของคอนกรีตเพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงบิดและศึกษาค่าการสูญเสียความสามารถเท่าได้ของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกสำหรับเป็นแนวทางเลือกและแนวโน้มเพื่อนำไปใช้ต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกกับคอนกรีตควบคุม

2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าการสูญเสียความสามารถเท่าได้ของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกกับคอนกรีตควบคุม

## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 การเตรียมวัสดุตัวอย่างทดสอบ

3.1.1 เศษเซรามิกที่ใช้ทดสอบมาจากจังหวัดพะเยา [6] กำหนดปริมาณเศษเซรามิกที่ใช้แทนที่มวลรวมหยาบ ร้อยละ 5, 10 ของหน่วยน้ำหนักมวลรวมละเอียดใช้สัญลักษณ์แทนด้วย CO และปริมาณเศษเซรามิกที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 2.5, 5 ของหน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย S

3.1.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุครบ 3, 7, 28 และ 56 วัน ขนาด 10.0x10.0x10.0 cm จำนวน 180 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C 39 [7] (ทดสอบค่า  $f_c'$  = 210, 240, 280 ksc) ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดอัตราส่วนผสมที่ออกแบบคอนกรีตในการศึกษา

ประเภทตัวอย่าง ทดสอบ	อายุตัวอย่างทดสอบ (วัน)	กำลังอัดที่ใช้ออกแบบ, $f_c'$ (ksc)	จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ (ตัวอย่าง)
OPC	3, 7, 28, 56	210, 240, 280	36
S2.5-CO5	3, 7, 28, 56	210, 240, 280	36
S2.5-CO10	3, 7, 28, 56	210, 240, 280	36
S5-CO5	3, 7, 28, 56	210, 240, 280	36
S5-CO10	3, 7, 28, 56	210, 240, 280	36

3.1.3 ทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุครบ 28 วัน ขนาด 10.0 x 10.0 x 50.0 cm จำนวน 45 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C 78 [8] (ทดสอบค่า  $f_c'$  = 210, 240, 280 ksc)

3.1.4 ทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกตามมาตรฐาน ASTM C496 [9] จำนวน 60 ตัวอย่าง และกำลังรับแรงดึงทางตรง ตัวอย่างขนาด  $\varnothing$  15.0 cm สูง 30 cm ทดสอบตัวอย่างที่อายุครบ 28 วัน จำนวน 60 ตัวอย่าง (ทดสอบค่า  $f_c'$  = 210, 240, 280, 320 ksc)

3.1.5 ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนคอนกรีตตามมาตรฐาน JSCE-SF6 ขนาด 15.0 x 15.0 x 50.0 cm ทดสอบตัวอย่างที่อายุครบ 28 วัน [10] จำนวน 60 ตัวอย่าง (ทดสอบค่า  $f_c'$  = 210, 240, 280, 320 ksc)

3.1.6 ทดสอบแรงบิดของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกขนาด 10.0 x 10.0 x 50.0 cm ทดสอบตัวอย่างที่อายุครบ 28 วัน [11] จำนวน 60 ตัวอย่าง

3.1.7 การศึกษาใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [12]

3.1.8 ย่อยเศษเซรามิกให้ขนาดเท่ากับหิน 3/4 นิ้ว โดยวิธีการทุบแล้วนำเข้าเครื่อง Los Angeles หมุนจำนวน 200 รอบ แล้วร่อนผ่านตะแกรงนำส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ขึ้นไปนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบและย่อยเศษเซรามิกให้ขนาดเท่ากับทรายโดยนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ของการร่อนมวลรวมหยาบมาใช้เป็นมวลรวมละเอียด

3.1.9 คอนกรีตที่ใช้ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1:91 [13] เท่ากับ 210, 240, 280 และ 320 ksc และ กำหนดค่า  $w/c$  ใช้ที่อยู่ระหว่าง 0.52 ถึง 0.68

3.1.10 น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตเป็นน้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดต่างในช่วง 6-8

3.1.11 สารเคมีผสมเพิ่มเป็นสารประเภทลดน้ำและหน่วงการก่อตัว Plastocrete-901 ประเภท D ตามมาตรฐาน ASTM C494 [14]

3.1.12 ทราเยแม่ น้ำและหินโม ในจังหวัดเชียงรายที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM C33 [15]

### 3.2 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) หินขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว ทราเยหยาบแม่ น้ำ เศษเซรามิก ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ เช่น ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวม การหาขนาดคละของมวลรวม [15] และการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่น เพื่อนำค่ามาออกแบบส่วนผสมในคอนกรีตและทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิกเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษเซรามิก ที่อายุคอนกรีต 3, 7, 28, 56 วัน และทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตที่อายุคอนกรีต 28 วัน [14-16]

### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมเศษเซรามิก

เนื่องจากเศษเซรามิกที่นำมาจากแหล่งผลิตนั้นมีขนาดไม่ได้ตามวัตถุประสงค์ที่จะนำมาทดสอบ จึงต้องมีการนำเศษเซรามิกไปย่อยให้มีขนาดตรงตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ นำเศษเซรามิกที่ผ่านการย่อยเข้าเครื่อง Los Angeles Machine โดยใช้ลูกเหล็ก 12 ลูก ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว 30-33 รอบ/นาที ตั้งค่าเครื่องให้หมุนจำนวน 200 รอบ เพื่อให้ขนาดของเศษเซรามิกเล็กลง จากนั้นนำเศษเซรามิกที่ผ่านเครื่อง Los Angeles Machine มาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานใช้เวลาร่อนประมาณ 5-10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ขึ้นไปคือเซรามิกที่นำไปใช้แทนที่ของมวลรวมหยาบและส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ลงไปคือ เซรามิกที่นำไปใช้แทนที่ของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 1 การย่อยและการหาขนาดคละของเศษเซรามิก

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบพฤติกรรมทางกลของคอนกรีต

ขั้นตอนในการทดสอบหาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตจะต้องทำการหล่อตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบโดยการเตรียมส่วนผสมในอัตราส่วนที่กำหนดไว้โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หินขนาด 3/4 นิ้ว ทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง น้ำสะอาด เซรามิกแทนที่มวลรวมหยาบและเซรามิกแทนที่มวลรวมละเอียด จัดเตรียมแบบหล่อและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบให้เรียบร้อย นำส่วนผสมมวลรวมต่างๆซึ่งน้ำหนักที่ได้ออกแบบไว้ใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีตชนิดราบ จากนั้นนำปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ค่อยๆใส่ลงในเครื่องผสมนำน้ำที่เตรียมไว้ค่อยๆใส่ลงในเครื่องผสมพยายามใส่น้ำกระจายให้ทั่วในวัสดุผสม และทำการผสมเปียกประมาณ 3-5 นาที เทคอนกรีตลงในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด  $10.0 \times 10.0 \times 10.0$  cm ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อหล่อเสร็จแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบหล่อแล้วนำไปบ่มในน้ำ [14-16] ตามมาตรฐาน ASTM C31 [17] และ ASTM C192 [18] ส่วนตัวอย่างมีขนาด  $10.0 \times 10.0 \times 50.0$  cm และตัวอย่างขนาด  $\varnothing 15.0$  cm สูง 30 cm เมื่อหล่อเสร็จทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบหล่อคอนกรีตแล้วนำไปบ่มในน้ำ



รูปที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตและการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อ

#### 3.4.2 การทดสอบค่าสูญเสียความสามารถเทได้ของคอนกรีต (Slump Loss)

การสูญเสียความเหลวของคอนกรีตสดเมื่อเวลาผ่านไปการสูญเสียค่าการยุบตัวจะช่วยอธิบายความสามารถเทได้ของคอนกรีตจนถึงสถานะแข็งตัวขึ้นเรื่อย ๆ จากผลของการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากการดูดซึมของมวลรวมและจากการระเหย ดังนั้นเมื่อคอนกรีตถูกผสมขึ้นมาแล้วควรรีบลำเลียงและแต่งผิวให้ทันกับระยะเวลาที่คอนกรีตยังสามารถทำงานได้เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียค่าการยุบตัว โดยจะทำการทดสอบค่าการยุบตัวทุก ๆ เวลา 15 นาที จนกว่าค่าการยุบตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังในรูปที่ 3 และจัดบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 3 การยู่ตัวของคอนกรีตทุก ๆ 15 นาที และการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

### 3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Strength Test of Concrete, $fc'$ )

เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด [19] ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 180 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิคเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษเซรามิค ที่อายุคอนกรีต 3, 7, 28, 56 วัน โดยนำตัวอย่างที่เตรียมไว้วางบนแท่นทดสอบด้วยเครื่อง Compression Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM C 39 ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งต้องเลือกด้านที่มีผิวเรียบที่สุดสัมผัสกับแท่นทดสอบ แล้วทดสอบแรงกดอัดจนกระทั่งได้ค่าแรงสูงสุดและจดบันทึกผลการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดจะพิจารณาจากแรงอัด ( $P_{max}$ ) ที่กระทำกับตัวอย่างบนพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) ที่มีผิวที่เรียบและตั้งฉากซึ่งทำให้ตัวอย่างจะเกิดการหดตัวภายใต้แรงอัด การทดสอบแรงอัดนี้ต้องมีลักษณะกระทำทางด้านสั้นหรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าความยาว เนื่องจากการทดสอบแรงอัดกับตัวอย่างจะเกิดการโค้งงอด้านข้าง ซึ่งกำลังรับแรงอัดสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 1

$$fc' = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบในการออกแบบทำให้สามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมด้วยทรายหยาบและสามารถนำมาใช้กับคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปได้ [20] ต่อจากนั้นก็มีผู้วิจัยศึกษาพฤติกรรมและวิธีการคำนวณกำลังรับแรงอัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเข้าไปแทนที่ในส่วนผสมโดยปริมาตรของคอนกรีตซึ่งสามารถช่วยให้กำลังรับแรงอัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยมีค่าสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใย [21] ในขณะที่ได้มีการศึกษาวิจัยนำกากดินตะกอนจากการผลิตกระเบื้องหลังคาเซรามิคมาเป็นส่วนผสมทดแทนผงอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ด้วยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์:ปูนขาว:ยิบซัม ซึ่งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด, ความหนาแน่นเชิงปริมาตร และกำลังแรงดัดที่แทนที่ด้วยกากดินตะกอนเซรามิคมีค่าร้อยละสูงขึ้นตาม

ปริมาณของกากดินตะกอนและอายุการบ่มที่มากขึ้นและเมื่อทำการเทียบค่าใช้จ่ายต้นทุนของการนำกากดินตะกอนมาใช้ ในการหาปริมาณต่อตารางเมตรสามารถประหยัดต้นทุนการผลิตได้ [22] อีกทั้งได้มีการศึกษาผลกระทบของวัสดุเหลือทิ้งเซรามิกที่ใช้เป็นมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตเป็นการนำลูกถ้วยเซรามิกฉนวนไฟฟ้าเหลือทิ้ง ใช้เป็นมวลรวมหยาบผสมในคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยด้วยหินเซรามิกย่อยสามารถทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมหินเซรามิกย่อยมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่มีส่วนผสมปกติ [23] รวมถึงได้มีการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมกระเบื้องเซรามิกที่ใช้แล้วแทนที่มวลรวมหยาบเสริมเส้นใยเหล็กที่เหลือทิ้งจากการกลึงในส่วนผสมของคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมจากการศึกษาสามารถทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและเมื่อเสริมเส้นใยเหล็กในปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง สำหรับการทดสอบกำลังดึงและ กำลังดัดเมื่อเสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตจะได้ค่าที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการผลิตผสมเส้นใยเหล็ก [24] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถนำวัสดุเข้ามาแทนที่มวลรวมได้

#### 3.4.4 การทดสอบแรงดัด (Bending Testing)

การทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบจะพิจารณาแรงกระทำในลักษณะแรงดัดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโครงสร้างรับแรงดัด เช่น ฐานราก คาน พื้นที่หล่อในที่ พื้นสำเร็จรูป บันได ออกไก่ แป้ จันทัน เมื่อโครงสร้างมีน้ำหนักกระทำในแนวตั้งฉากกับแนวแกนทางด้านยาวจะเกิดการโค้งงอ การแอ่นตัวหรือโก่งตัว แล้วแต่ว่าขนาดของน้ำหนักกระทำและประเภทของโครงสร้าง ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบแบบการกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-Point Loading) ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิกเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษเซรามิก โดยมีขนาดตัวอย่างทดสอบกำลังดัดคอนกรีต 10.0 × 10.0 × 50.0 cm จำนวน 45 ตัวอย่าง ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ทดสอบกำลังรับแรงดัดภายใต้มาตรฐาน ASTM C 78 ดังแสดงในรูปที่ 4 สามารถหาค่าโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีตได้ ดังสมการที่ 2

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

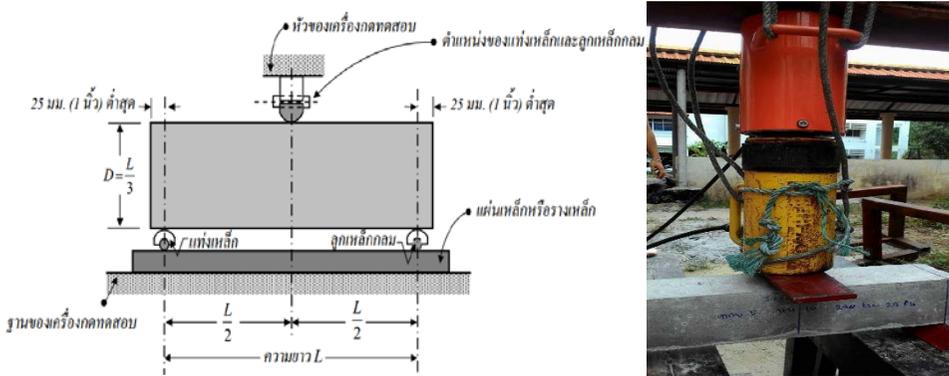
เมื่อ  $R$  คือ กำลังรับแรงดัด หน่วยเป็น เมกาปาสกาล

$P$  คือ แรงสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ หน่วยเป็น N

$L$  คือ ช่วงคาน หน่วยเป็น mm

$b$  คือ ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก หน่วยเป็น mm

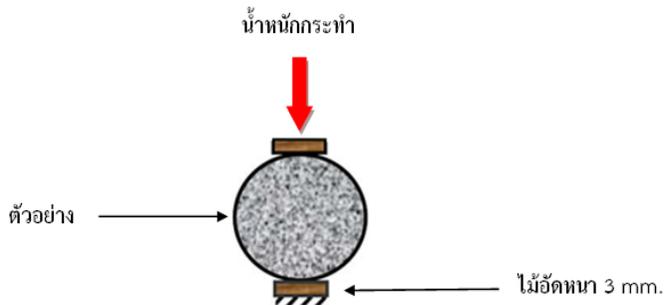
$d$  คือ ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก หน่วยเป็น mm



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังดัดคอนกรีตวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่กึ่งกลางคาน

**3.4.5 การทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Test for Splitting Tensile Strength of Concrete)**

การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงผ่าซีกของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบขนาด  $\text{Ø}15.0 \times 30.0 \text{ cm}$  จำนวน 75 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิคเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษเซรามิค ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM C496 ดังแสดงในรูปที่ 5

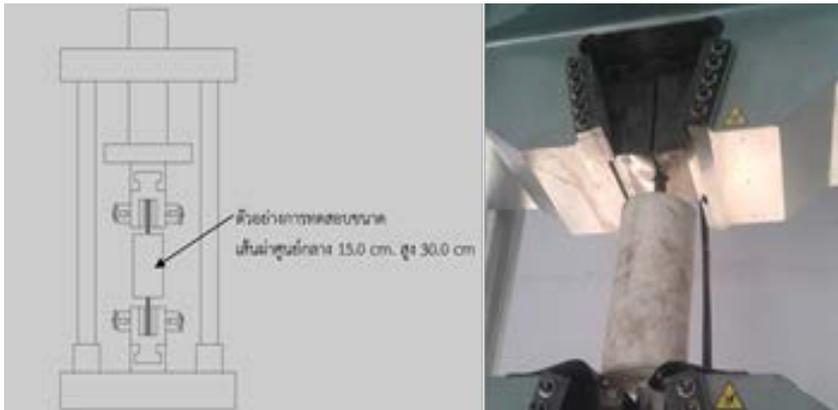


รูปที่ 5 การทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีต

**3.4.6 การทดสอบแรงดึงทางตรง (Direct Tensile Testing Strength of Concrete)**

เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางตรงของคอนกรีตโดยกำหนดให้เกิดแรงดึงขาดในบริเวณเนื้อคอนกรีตและทดสอบแรงดึงเหล็กขนาด DB 25 mm ชั้นคุณภาพ SD 40 ที่ฝังอยู่ในคอนกรีตในทิศทางที่ตรงกันข้ามเพื่อให้คอนกรีตเกิดการวิบัติและแตกออกจากกัน โดยมีตัวอย่าง

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบขนาด  $\text{Ø}15.0 \times 30.0 \text{ cm}$  จำนวน 75 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางตรงของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิคเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษเซรามิค ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM A370 ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดสอบกำลังดึงทางตรงของคอนกรีต

### 3.4.7 การทดสอบแรงเฉือน (Test for shear Strength of Concrete)

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบขนาด  $15.0 \times 15.0 \times 30.0 \text{ cm}$  จำนวน 75 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิคเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษเซรามิค ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ตามมาตรฐาน JSCE-SF6 ดังแสดงในรูปที่ 7 การทดสอบแรงเฉือนเป็นการใส่แรงกระทำในแนวขนานกับแนวระนาบของชั้นทดสอบการเฉือนนี้แตกต่างจากการดึงและการตัดซึ่งใส่แรงในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงาน แรงเฉือนสองชนิดที่สำคัญในการกำหนดสมบัติทางกลของวัสดุได้แก่แรงเฉือนตรง (Direct shear) ให้ออกกับแรงเฉือนบิด (Torsion shear) กำลังเฉือนหรือแรงเฉือนเป็นการกระทำต่อระนาบของแรง แรงที่ขนานและขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้วัสดุแยกออกจากกันโดยแรงเฉือนตรงสามารถแยกออกได้เป็นสองแบบคือ แรงเฉือนเดี่ยว (Single shear) กับแรงเฉือนคู่ (Double shear) ที่มีการเสริมเหล็กและไม่มีการเสริมเหล็กได้จากสมการที่ 3

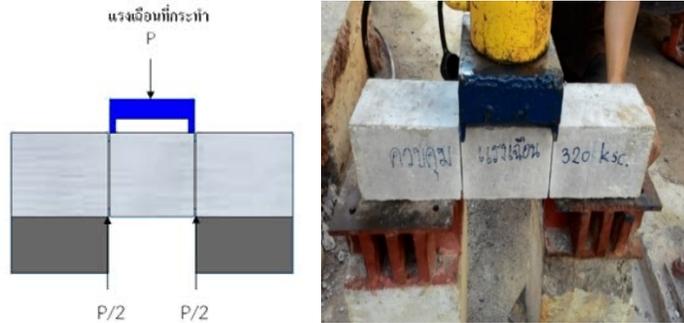
$$V_c = \frac{P}{bd} \quad (3)$$

เมื่อ  $V_c$  = หน่วยแรงเฉือน

$P$  = แรงเฉือนที่กระทำ

$b$  = ความกว้าง

$d$  = ความลึก



รูปที่ 7 ทดสอบแรงเฉือนคู่ของตัวอย่างตามมาตรฐาน JSCE-SF6

### 3.4.8 การทดสอบแรงบิด (Test for Torsion Strength of Concrete)

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงบิดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบขนาด  $10.0 \times 10.0 \times 50.0$  cm จำนวน 75 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงบิดของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิคเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษเซรามิค ที่อายุคอนกรีต 28 วัน โดยนำตัวอย่างชุดทดสอบติดตั้งกับชุดทดสอบแรงบิด ซึ่งให้ปลายด้านยึดแน่นและปลายอีกด้านหนึ่งถูกยึดกับแท่นหมุนอิสระรอบแกนและให้แรงบิด (Torque) หรือโมเมนต์บิดที่กระทำต่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 50 ตัน โดยใช้เครื่องวัดแรงสูงสุดบันทึกค่าการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อพิจารณาคูณสมบัติของหน้าตัดตามแกนความเครียดเฉือนโดยให้แปรค่าจากที่ศูนย์กลางตัวอย่างคอนกรีตไปยังค่าที่มากที่สุดที่พื้นผิวภายนอกของตัวอย่างคอนกรีต เนื่องจากความสม่ำเสมอของความเครียดเฉือนที่จุดทั้งหมดบนรัศมีเดียวกัน หน้าตัดจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแต่ยังคงอยู่ในระนาบ ภายหลังจากตัวอย่างคอนกรีตมีมุมของการบิดจะมีหน้าตัดไม่เป็นระนาบที่สมมาตรตามแนวแกน เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนบนหน้าตัดดังกล่าวนี้จะกระจาย ในลักษณะที่ซับซ้อนมากขึ้นหน้าตัดนี้จะเกิดการนูนออกมา หรือโก่งตัวเมื่อตัวอย่างถูกบิดจนเห็นได้ ชัดเจนจากวิธีการที่แนวเส้นตัดกันแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อโมเมนต์บิดกระทำ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างนี้ การวิเคราะห์แรงบิดของตัวอย่างที่ไม่ใช่รูปวงกลมจะถูกพิจารณาโดยขบวนการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนในทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานทฤษฎีของความยืดหยุ่นจำเป็นต้องหาการกระจายหน่วยแรงเฉือนภายในของตัวอย่างที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งหน่วยแรงเฉือนนี้จะแปรค่าตามแนวเส้นรัศมีในลักษณะที่ซับซ้อนความเครียดเฉือนทำให้เกิดการโก่งตัวของหน้าตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบว่าจุดมุมของตัวอย่างจะถูกกระทำด้วยหน่วยแรง

เฉือนที่มีค่าเป็นศูนย์และความเครียดเฉือนที่มีค่าเป็นศูนย์ เหตุผลนี้แสดงโดยพิจารณาชั้นส่วนของวัสดุที่อยู่ที่อยู่จุดใดจุดหนึ่งของผิวหน้าชั้นส่วนนี้จะถูกกระทำด้วยหน่วยแรงเฉือนเพื่อช่วยต้านทานแรงบิด ( $T$ ) กระทำ เนื่องจากหน่วยแรงเฉือน ( $\tau$ ) กระทำบนพื้นผิวภายนอกของตัวอย่างที่มีค่าเป็นศูนย์ การทดสอบแรงบิดต้องการศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างเมื่อปลายด้านหนึ่งจะถูกหมุนหรือบิดไปทำให้เกิดแรงบิด โดยทำการจับยึดปลายชิ้นงานด้านหนึ่งเข้ากับเครื่องทดสอบแรงบิด (Torsion testing machine) ชิ้นงานจะถูกบิดจากปลายด้านหนึ่งจนกระทั่งเกิดการแตกหัก ซึ่งในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กรอยร้าวจะทำให้เกิดการวิบัติ ถ้าไม่มีเหล็กเสริมตัดผ่านรอยร้าว ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เหล็กตามแนวยาวที่มุมทั้งสี่และเหล็กปลอกรับแรงบิดได้จากสมการที่ 4

$$\tau_{\max} = \frac{T}{\alpha x^2 y} \quad (4)$$

เมื่อ  $T$  = โมเมนต์บิด

$\alpha$  = อัตราส่วนของหน้าตัด

$x$  = ด้านแคบของหน้าตัด

$y$  = ด้านยาวของหน้าตัด



รูปที่ 8 การทดสอบแรงบิดของคอนกรีต

#### 4. ผลของการศึกษา

##### 4.1 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

##### 4.1.1 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ในการศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาดแทนที่มวลรวม เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาจึงได้ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของตัวอย่างวัสดุ

สำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบการอภิปรายผลและก่อนการผสมอัตราส่วนต่างๆต้องนำตัวอย่างวัสดุทั้งหมดนำมาทดสอบเพื่อให้ทราบคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งสามารถหาค่าต่างๆได้จากการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทดสอบความถ่วงจำเพาะของวัสดุ (Specific Gravity) การทดสอบการกระจายตัวของมวลรวมและเศษเซรามิคโดยผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Analysis) การทดสอบเหล็กเส้น ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบตามตารางที่ 2

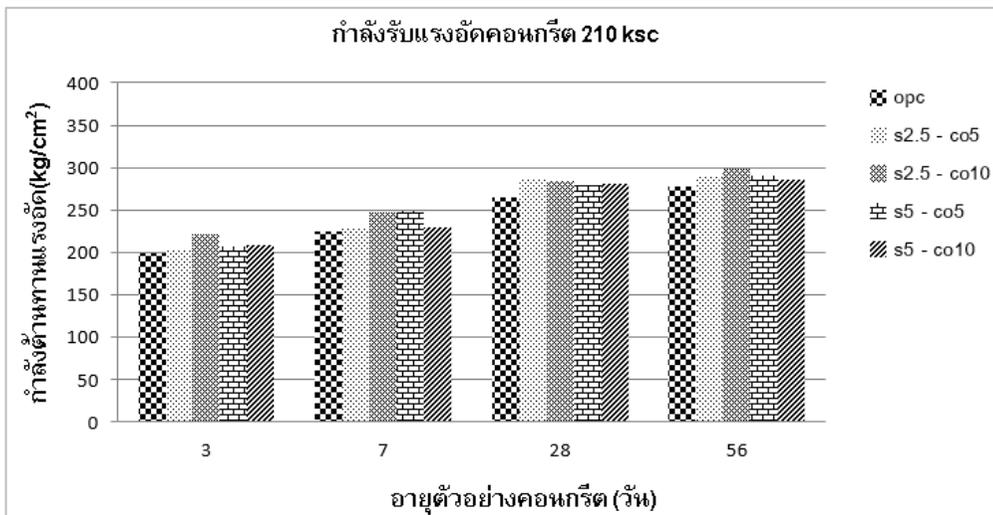
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของปูนซีเมนต์และมวลรวม			
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C188			3.15
ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C33			2.57
หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นของมวลรวมละเอียด ( $\text{kg/m}^3$ )			1,762
โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด			3.11
ร้อยละการดูดซึมของมวลรวมละเอียด (%)			1.74
ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C33			2.65
หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นของมวลรวมหยาบ ( $\text{kg/m}^3$ )			1,560
ร้อยละการดูดซึมของมวลรวมหยาบ (%)			2.04
ค่าอัตราส่วนช่องว่างของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (หินหลวม) ASTM C-29			37.65
อัตราส่วนช่องว่างของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (หินอัดแน่น) ASTM C-29			31.76
ความสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบ (%) ASTM C-131			34.23
การทดสอบเหล็กเส้น			
ขนาดและชนิดเหล็ก	กำลังรับแรงดึงจุดคราก (ksc)	กำลังรับแรงดึงสูงสุด (ksc)	% การยืด
DB 25 mm.(SD40)	4,780	7,580	20.75
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของเศษเซรามิค			
ค่าความถ่วงจำเพาะของเศษเซรามิค			2.36
โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด			3.11
ร้อยละการดูดซึมของเศษเซรามิค (%)			1.32
หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นของเศษเซรามิคแทนที่มวลรวมละเอียด ( $\text{kg/m}^3$ )			1,411
หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นของเศษเซรามิคแทนที่มวลรวมหยาบ ( $\text{kg/m}^3$ )			1,377

## 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compression Strength Test of Concrete)

### 4.2.1 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 210 ksc

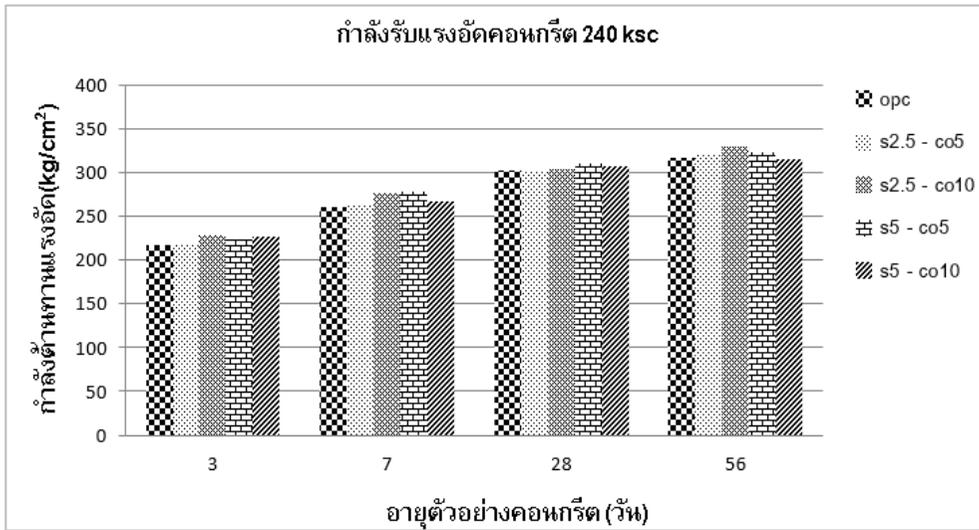
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นการพัฒนากำลังรับแรงอัดเมื่อคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนและพบว่าคอนกรีตผสมเศษเซรามิกที่อัตราส่วนแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแทนที่มวลรวมหยาบ ร้อยละ 10 ของหน่วยน้ำหนักมวลรวมละเอียด (S2.5-CO10) มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดีที่สุดโดยมีค่าอยู่ที่ 284.79 ksc ซึ่งมากกว่าคอนกรีตควบคุม (OPC) คิดเป็นร้อยละ 107.48 ที่อายุ 28 วัน และคิดเป็นร้อยละ 107.32 ที่อายุ 56 วัน



รูปที่ 9 ผลทดสอบเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 210 ksc ที่ช่วงอายุต่าง ๆ

### 4.2.2 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 240 ksc

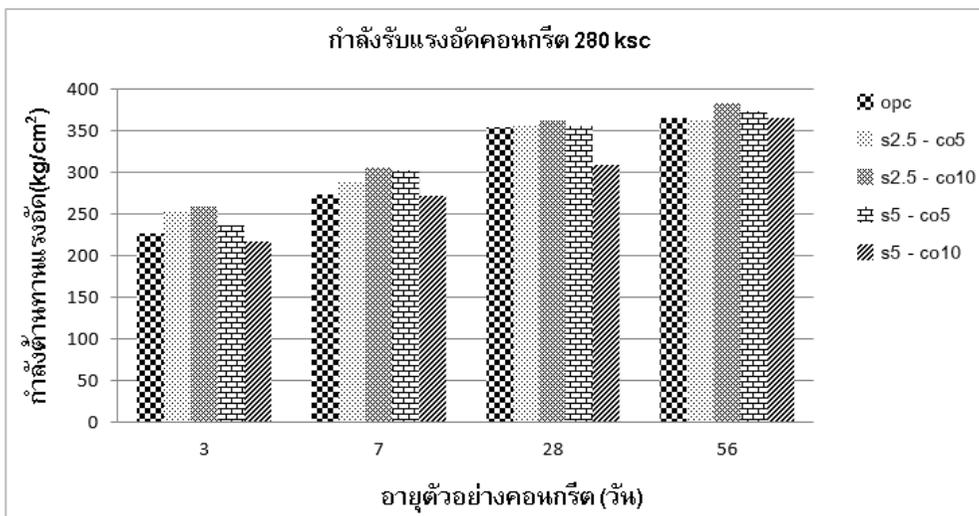
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นการพัฒนากำลังรับแรงอัดเมื่อคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนและพบว่าคอนกรีตผสมเศษเซรามิกที่อัตราส่วน S2.5-CO10 มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดีที่สุดโดยมีค่าอยู่ที่ 304.15 ksc ซึ่งมากกว่าคอนกรีตควบคุม (OPC) คิดเป็นร้อยละ 100.96 ที่อายุ 28 วัน และคิดเป็นร้อยละ 103.59 ที่อายุ 56 วัน



รูปที่ 10 ผลทดสอบเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 240 ksc ที่ช่วงอายุต่าง ๆ

4.2.3 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 280 ksc

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นการพัฒนา กำลังรับแรงอัดเมื่อคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนและพบว่าคอนกรีตผสมเศษเซรามิกที่อัตราส่วน S2.5-CO10 มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดีที่สุดในค่าอยู่ที่ 361.20 ksc ซึ่งมากกว่าคอนกรีตควบคุม (OPC) คิดเป็นร้อยละ 102.06 ที่อายุ 28 วัน และคิดเป็นร้อยละ 104.94 ที่อายุ 56 วัน

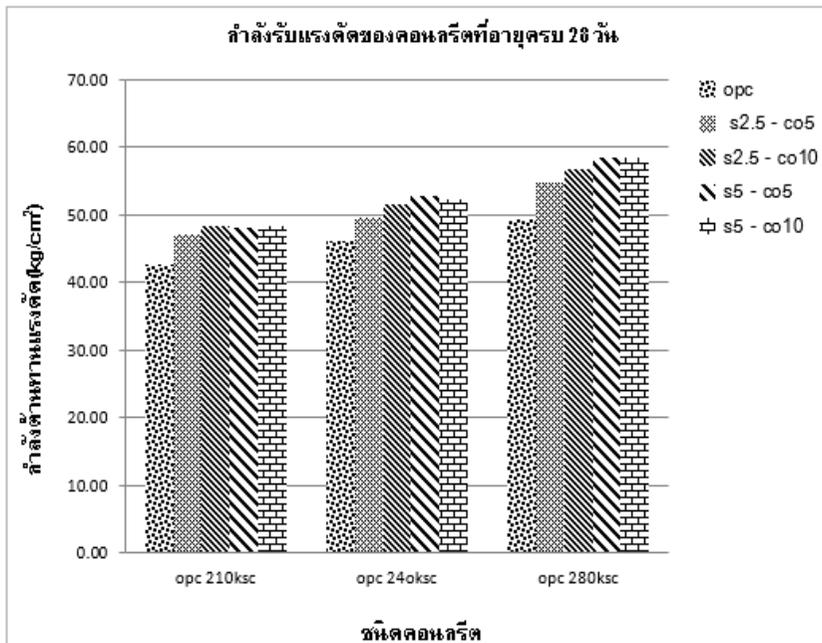


รูปที่ 11 ผลทดสอบเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 280 ksc ที่ช่วงอายุต่าง ๆ

จากรูปที่ 9, 10 และ 11 แสดงให้เห็นว่าการที่นำเศษเซรามิกเข้าไปแทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ในอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุคอนกรีต 28 วัน และเมื่อตรวจสอบค่ากำลังรับแรงอัดอีกครั้งที่อายุคอนกรีต 56 วัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิกยังมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมเพราะเศษเซรามิกที่เข้าไปแทนที่ในมวลรวมละเอียดมีพื้นที่ผิวสูงมีผิวที่ขรุขระ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่ามวลรวมละเอียดที่ได้จากธรรมชาติจึงมีพื้นที่สำหรับการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์มาก ผิวที่หยาบจะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ดีขึ้นและทำให้กำลังรับแรงของคอนกรีตดีขึ้นด้วย

### 4.3 ผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Bending Testing)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกที่อายุ 28 วันมีค่ากำลังดัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม (OPC) ทุกอัตราส่วนผสมเนื่องจากการแทนที่มวลรวมด้วยเศษเซรามิก 2 ขนาดมีขนาดรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมคม พื้นที่ผิวสัมผัสหยาบและขรุขระ จึงช่วยให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมดีขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM C-78



รูปที่ 12 ผลทดสอบเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุครบ 28 วัน

#### 4.4 ผลการทดสอบการสูญเสียความสามารถเทได้ของคอนกรีต (Workability)

จากตารางที่ 3, 4 และ 5 ผลการทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิกมีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดที่ 210 ksc ค่าการยุบตัวของคอนกรีตควบคุมอยู่ที่ 0.5 cm. ที่ระยะเวลา 75 นาที เมื่อผสมเศษวัสดุเซรามิกเข้าไปในอัตราส่วน S2.5-CO5, S2.5-CO10, S5-CO5 และ S5-CO10 พบว่าที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ 0.5 cm อยู่ในช่วงระยะเวลา 75-90 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 240 ksc คอนกรีตควบคุม มีค่าการยุบตัว 0.5 cm ที่ระยะเวลา 75 นาที และเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเซรามิกเข้าไปในอัตราส่วน S2.5-CO5, S2.5-CO10, S5-CO5 และ S5-CO10 พบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม โดยที่ค่าการยุบตัว 0.5 cm มีระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในช่วง 75-90 นาที และที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 280 ksc คอนกรีตควบคุมมีค่าการยุบตัว 0.5 cm ที่ระยะเวลา 75 นาที และเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเซรามิกเข้าไปในอัตราส่วน S2.5-CO5, S2.5-CO10, S5-CO5 และ S5-CO10 มีค่าการก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 8-9.5 cm โดยที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ที่ 0.5 cm มีระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในช่วง 75-90 นาที

ตารางที่ 3 ผลทดสอบการสูญเสียความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 210 ksc

ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (cm)								
อัตราส่วนผสม	ระยะเวลาการทดสอบ (นาที)							
	0	15	30	45	60	75	90	105
OPC	9.0	7.0	3.0	2.5	1.5	0.5	-	-
S2.5-CO5	10.0	7.0	3.0	2.5	1.5	1.0	0.5	-
S2.5-CO10	9.5	5.0	4.0	2.0	1.0	0.5	-	-
S5-CO5	10.0	5.0	4.5	2.5	2.0	1.0	0.5	-
S5-CO10	9.5	4.0	2.5	1.5	1.0	0.5	-	-

**ตารางที่ 4 ผลทดสอบการสูญเสียความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 240 ksc**

ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (cm)								
อัตราส่วนผสม	ระยะเวลาการทดสอบ (นาที)							
	0	15	30	45	60	75	90	105
OPC	9.0	5.0	3.0	2.0	1.0	0.5	-	-
S2.5-CO5	9.5	6.0	5.5	4.0	2.0	1.5	0.5	-
S2.5-CO10	10.0	4.5	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	-
S5-CO5	9.5	5.0	3.0	2.5	1.5	0.5	-	-
S5-CO10	10.0	3.5	3.0	2.0	1.5	0.5	-	-

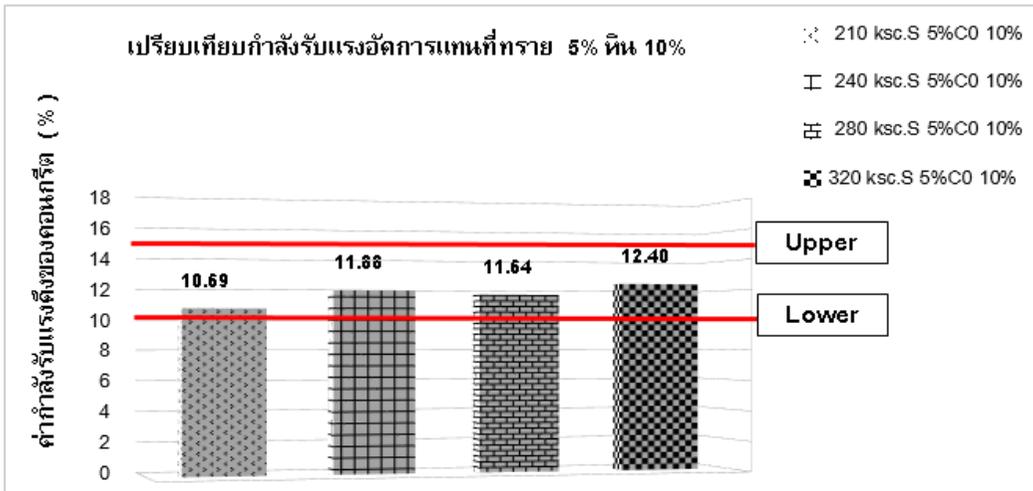
**ตารางที่ 5 ผลทดสอบการสูญเสียความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด 280 ksc**

ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (cm)								
อัตราส่วนผสม	ระยะเวลาการทดสอบ (นาที)							
	0	15	30	45	60	75	90	105
OPC	9.0	4.0	2.0	1.5	1.0	0.5	-	-
S2.5-CO5	8.0	5.5	5.0	2.0	2.0	1.0	0.5	-
S2.5-CO10	9.5	5.0	3.5	2.5	1.5	0.5	-	-
S5-CO5	8.0	4.5	3.0	2.0	1.5	0.5	-	-
S5-CO10	8.0	5.0	2.7	2.0	1.5	0.5	-	-

#### 4.5 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

##### 4.5.1 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด

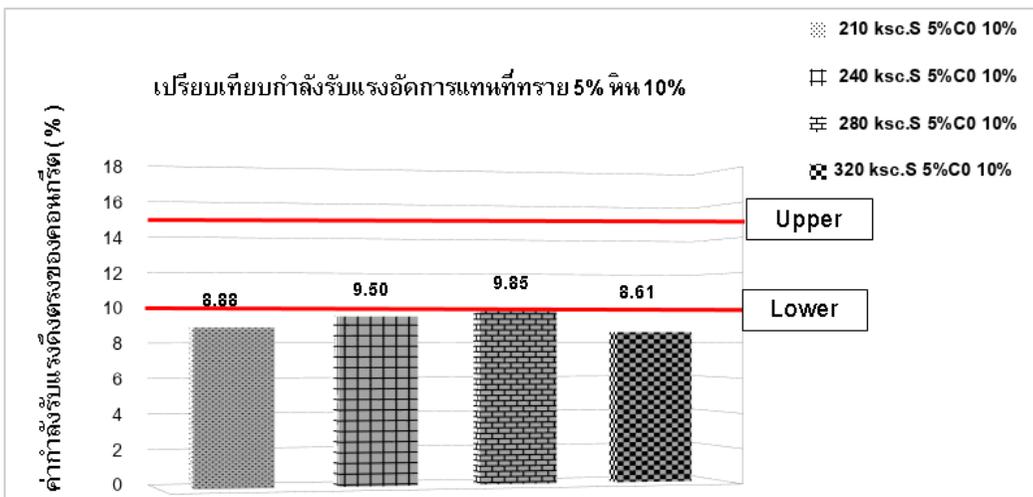
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496 เมื่อพิจารณาการแทนที่ที่ดีที่สุดเท่ากับทรายร้อยละ 5 และหินร้อยละ 10 (S5-CO10) ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 210, 240, 280 และ 320 ksc มีกำลังรับแรงดึงผ่าซีกสูงกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็นร้อยละ 10.69, 10.88, 11.64 และ 12.40 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดต่าง ๆ

4.5.2 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงทางตรงของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด

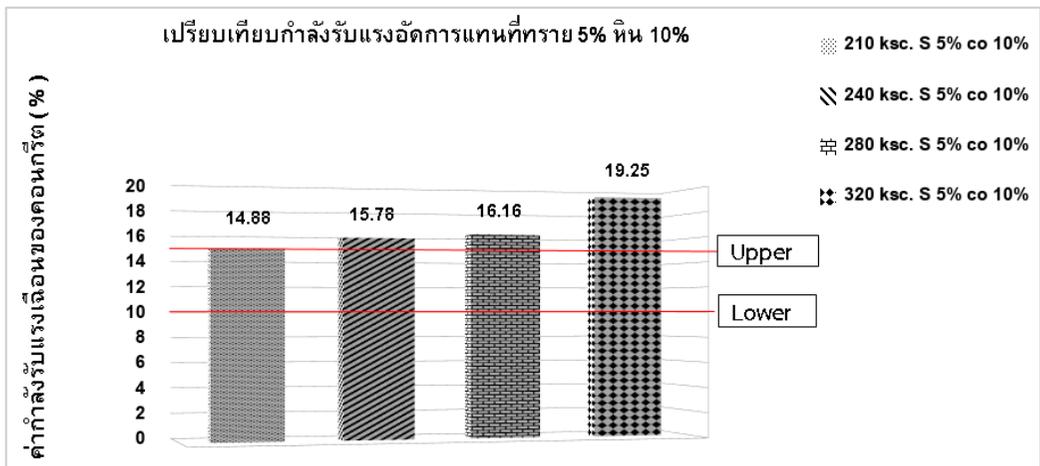
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ที่ดีที่สุดเท่ากับทรายร้อยละ 5 และ หิน ร้อยละ 10 (S5-CO10) ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 210, 240, 280 และ 320 ksc มีกำลังรับแรงดึงทางตรงสูงกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็นร้อยละ 8.88, 9.50, 9.85 และ 8.61 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงทางตรงของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดต่าง ๆ

#### 4.6 ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

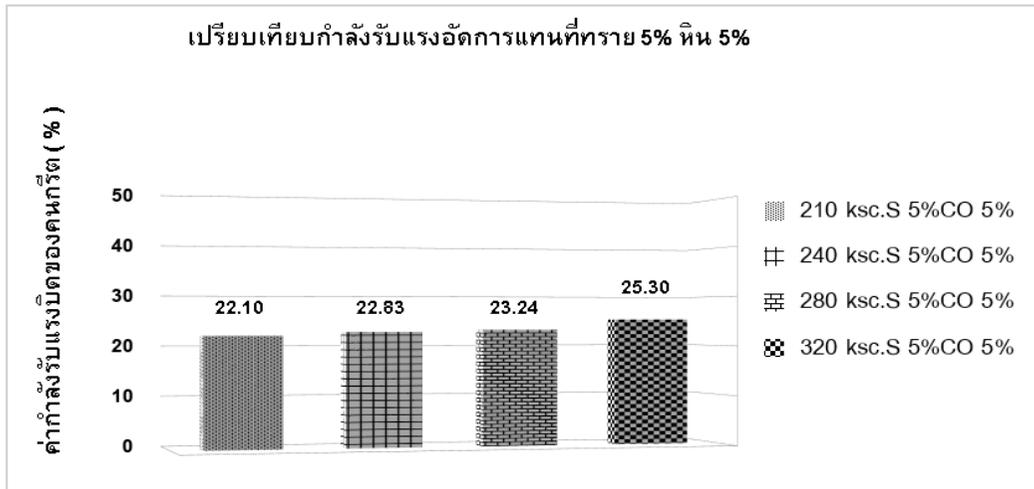
ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน โดยพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ที่ดีที่สุดเท่ากับทรายร้อยละ 5 และ หินร้อยละ 10 (S5-CO10) ของคอนกรีต พบว่าค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 210, 240 280 และ 320 ksc มีกำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็นร้อยละ 14.88, 15.78, 16.16 และ 19.25 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ค่าออกแบบกำลังรับแรงอัดต่าง ๆ

#### 4.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังรับแรงบิดของคอนกรีตซึ่งออกแบบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน โดยพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ที่ดีที่สุดเท่ากับทรายร้อยละ 5 และ หินร้อยละ 5 (S5-CO5) ของคอนกรีต พบว่าค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 210, 240, 280 และ 320 ksc มีกำลังรับแรงบิดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม (OPC) คิดเป็นร้อยละ 22.10, 22.83, 23.24 และ 25.30 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลทดสอบกำลังรับแรงบิตของคอนกรีตที่ค่าออกแบบกำลังรับแรงอัดต่าง ๆ

## 5. สรุปผลการศึกษา

เมื่อนำวัสดุส่วนผสมต่างๆทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาดแทนที่มวลรวมโดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเศษเซรามิก แสดงให้เห็นถึงประโยชน์และความสามารถในการนำเศษเซรามิกที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถนำมาผสมในคอนกรีตและทำให้พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตมีแนวโน้มในการพัฒนาที่ดีและต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสม จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า การใช้เศษเซรามิกแทนที่มวลรวม จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเซรามิกมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่ามวลรวมละเอียดและเศษเซรามิกมีพื้นผิวที่ขรุขระมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่ามวลรวมทั้งหมด ซึ่งเป็นผลมาจากการผ่านกระบวนการบด จึงส่งผลให้เศษเซรามิกมีการยึดเกาะได้ดีกว่า โดยคอนกรีตผสมเศษเซรามิกร้อยละ S2.5-CO10 ให้กำลังอัดสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามหากใส่เศษเซรามิกในอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตลดลง และจากการศึกษาค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเศษเซรามิก พบว่าค่ายุบตัวไม่แตกต่างกันกับคอนกรีตควบคุม ในขณะที่เดียวกันการศึกษาคูณสมบัติกำลังรับแรงดึงผ่าซีก แรงดึงทางตรง แรงเฉือน และแรงบิตของคอนกรีตผสมเศษเซรามิก 2 ขนาด ซึ่งเศษเซรามิกมีพื้นผิวที่ขรุขระมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่ามวลรวมทั้งหมด เป็นผลมาจากการผ่านกระบวนการบด จึงทำให้เศษเซรามิกช่วยให้การยึดเกาะได้ดีกว่าโดยการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจะทำให้กำลังรับแรงดึงผ่าซีก แรงดึงทางตรงและแรงเฉือนของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกร้อยละ S5-CO10 มีกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และจากผลทดสอบกำลังรับ

แรงบิดของคอนกรีตผสมเศษเซรามิกร้อยละ S5-CO5 มีแนวโน้มในการพัฒนาค่ากำลังรับแรงบิดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (OPC)

### กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้ศึกษาต้องขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา ประกอบด้วย คุณคงศักดิ์ วัฒนคุณทรัพย์ ชวัญดี คุณอนุพงษ์ แสงเทียน คุณเจษฎา ใจใจ และ คุณพิชชาภา เกิดผล ซึ่งเป็นผู้ร่วมดำเนินงานและได้สละเวลาช่วยเหลือมาโดยตลอดเป็นอย่างดีและช่วยตรวจสอบปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของเอกสารและขอขอบคุณ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำเทคนิคและวิธีการในด้านต่างๆ และเอื้อเฟื้อสถานที่การทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เชียงราย

### References

- [1] Nuran A, Mevlut U. The use of waste ceramic tile in cement production. Cement and Concrete Research 2000;30:497-9.
- [2] Senthamarai RM, Manoharan PD. Concrete with ceramic waste aggregate. Cement and concrete composites 2005;27:910-3.
- [3] Wattanasiriwech D. Industrial ceramics. Chaing Rai, Thailand: Mae Fah Luang University; 2011. (In Thai)
- [4] American Society for Testing and Material. ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2011.
- [5] American Society for Testing and Material. ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2011.
- [6] Amnuaypornlert S. A Study of property compressive strength and bending strength of concrete mixed with ceramic fragments. Kasalongkham Research Journal 2017;11(3): 279-91. (In Thai)
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM C39 Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2018.

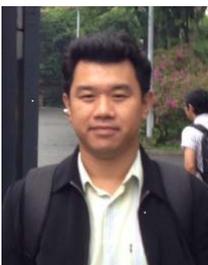
- [8] American Society for Testing and Material. ASTM C78 Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2011.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C496 Test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2017.
- [10] Japan Society of Civil Engineers. JSCE-SF6 Standard method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC). Tokyo, Japan: JSCE; 1990.
- [11] Ewida AA, McMullen AE. Torsion-shear-flexure interaction in reinforced concrete members. Magazine of Concrete Research 1981;23(115):113-22.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM C150 Standard Specification for portland cement. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2009.
- [13] ACI Committee 211. ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute; 1991.
- [14] Sethabutra C. Concrete technology. 8<sup>th</sup>ed. Bangkok, Thailand: Ready mixed concrete, Concrete Product and Aggregate; 2009. (In Thai)
- [15] Chindaprasirt P. Concrete technology. 2<sup>nd</sup>ed. Khonkaen, Thailand: Khonkaen University; 2009. (In Thai)
- [16] Chovichien V. Concrete technology. 9<sup>th</sup>ed. Bangkok, Thailand: Samphan Commercial Printing; 2001. (In Thai)
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM C31 Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2018.
- [18] American Society for Testing and Materials. ASTM C192 Practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2016.
- [19] British Standards Institution. BS EN 12390-3: Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. London, UK: BSI; 2009.

- [20] Thepprom T. The study of compressive strength of concrete by using silt stone instead of sand for fine aggregate: A case study on silt stone from Narathiwat stone mine. Journal of Narathiwat Rajanagarindra University 2009;1(2):28-41. (In Thai)
- [21] Sumranwanich T, et al. Behavior and calculation method of the flexural strength of reinforced concrete beam with fiber. KMUTT Research and Development Journal 2007; 8(3):345-62. (In Thai)
- [22] Thongklay S. Lightweight concrete from sediment sludge of ceramic roof tile. [master's thesis]. Pathum Thani, Thailand: Thanyaburi Rajamangala University of Technology; 2012. (In Thai)
- [23] Sawang N, et al. Effect of ceramic waste used as coarse aggregate on compressive strength and durability of concrete. [Bachelor of engineering (Civil Engineering)]. Khonkaen, Thailand: Khonkaen University; 2011. (In Thai)
- [24] Chusil N, et al. Mechanical properties of concrete mixed with reused ceramic tiles reinforced with steel fiber from milling processed. RMUTP Research Journal 2013; Special Issue:664-74. (In Thai)

### ประวัติผู้เขียนบทความ



**ดร.สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ** ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถานที่ทำงาน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย 99 หมู่ที่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทรศัพท์ 094-6407557 E-mail: aretomrit@gmail.com



**พงศ์พันธุ์ กาญจนการุณ** ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถานที่ทำงาน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย 99 หมู่ที่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120



อหุวัฒน์ เสมอเชื้อ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล  
ล้านนา เชียงราย 99 หมู่ที่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัด  
เชียงราย 57120

---

**Article History:**

Received: May 24, 2018

Revised: August 24, 2019

Accepted: August 29, 2019