

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อพารามิเตอร์การแตกหักของ
คานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบมีรอยบาก

EFFECTS OF W/C RATIOS ON FRACTURES PARAMETERS OF
RECYCLED AGGRAGETE CONCRETE NOTCHED-BEAMS

ยอดชาย สีสันดร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อพารามิเตอร์การแตกหักของคาน
คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบมีรอยบาก

ยอดชาย สี่พันดร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I
hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.



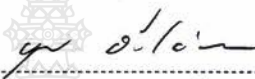
(.....สมชาย กล้าวิทย์กรณ์.....)

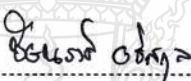



หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อพารามิเตอร์การแตกหักของ
คอนกรีตที่มีมวลหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่
Influences of Recycled Aggregate Content on Fracture Parameters
of Recycled Aggregate Concrete


ชื่อ - นามสกุล นายสมชาย กล้าวิทย์กรณ์
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์กำธรเกียรติ มุสิเกต, Ph.D.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

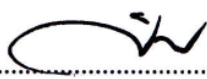

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ชัยณรงค์ อธิสกุล, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กำธรเกียรติ มุสิเกต, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 4 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2563

| | |
|-------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบมีรอยบาก |
| ชื่อ-นามสกุล | นายยอดชาย สีพันดร |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์กำธรเกียรติ มุสิกเกต, Ph.D. |
| ปีการศึกษา | 2562 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบปกติในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.55, 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีการปรับปรุงคุณภาพให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนการนำไปใช้และการทดสอบตัวอย่างอายุบ่มน้ำที่ 28 วัน

ขั้นตอนการวิจัยแบ่งออกเป็นการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างรูปทรงกระบอกของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐาน ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลซึ่งมีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคานมีลักษณะและรูปทรงที่คล้ายคลึงกันจำนวน 3 ขนาดที่แตกต่างกัน ถูกใช้ในการทดสอบแรงกดแบบ 3 จุด เพื่อหาแรงกดสูงสุดซึ่งจะใช้สำหรับหาค่าคุณสมบัติการแตกหักโดย Size-Effect Method ต่อไป

ผลการทดสอบคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น พบว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยมีค่าลดลงร้อยละ 3.03 และ 5.05 ตามลำดับ กำลังรับแรงดึงแยกเฉลี่ยมีค่าลดลงร้อยละ 6.81 และ 9.10 ตามลำดับ สำหรับค่าพารามิเตอร์ของการแตกหักได้แก่ ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นมีค่าลดลงร้อยละ 16.56 และ 32.07 อัตราการปลดปล่อยพลังงานของการแตกหักมีค่าลดลงร้อยละ 37.50 และ 50.00 และความยาวประสิทธิผลบริเวณรอยร้าวมีค่าลดลงร้อยละ 45.68 และ 65.64 ตามลำดับส่วนตัวเลขความแปรปรวนกลับพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น อัตราการปลดปล่อยพลังงานการแตกหัก ตัวเลขความแปรปรวน ความยาวประสิทธิผลรอบบริเวณรอยร้าว

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Effects of W/C Ratios on Fracture Parameter of Recycled Aggregates Concrete Notched-Beam |
| Name-Surname | Mr. Yodchai Seephandorn |
| Program | Civil Engineering |
| Thesis Advisor | Assistant Professor Kamtornkiat Musiket, Ph.D. |
| Academic Year | 2019 |

ABSTRACT

This research presents the effects of water-to-cement ratios (W/C) on compressive strength, tensile strength, and the fracture parameters of Recycled Aggregate Concrete (RAC). The Recycled Aggregate (RA) was used to replace 50 percent of natural coarse aggregate. Designed water-to-cement ratios were 0.55, 0.60 and 0.65, respectively. Saturated surface-dry pre-treatment was applied to improve the quality of RA and the specimens were cured at 28 days prior to the experiments.

Two research methodologies were utilized in this research. The compressive and tensile strengths tests were carried out using cylindrical specimens for fundamental mechanical properties. At the same time, three different sizes of beams with notches in the middle were in similar shapes. The beams were used to test Three-point bending. The Three-point bending tests were examined to obtain the maximum transverse load that would be used to calculate fracture parameters using the Size-Effect Method.

The test results of recycled aggregate concrete with increasing water to cement ratios showed that the percentage of compressive strength decreased by 3.03 and 5.05. Tensile strength decreased by 6.81 and 9.10, respectively. For fracture parameters, Stress Intensity Factor (SIF) decreased by 16.56 and 32.07, fracture energy release rate (G_f) decreased by 16.56 and 32.07, and fracture process zone length decreased by 45.45 and 65.64, in this order. Inversely, the brittleness numbers (β) were found to be increased.

Keywords: recycled aggregate concrete (RAC), stress intensity factor (SIF), fracture energy release rate, brittleness number, fracture process zone length

กิตติกรรมประกาศ

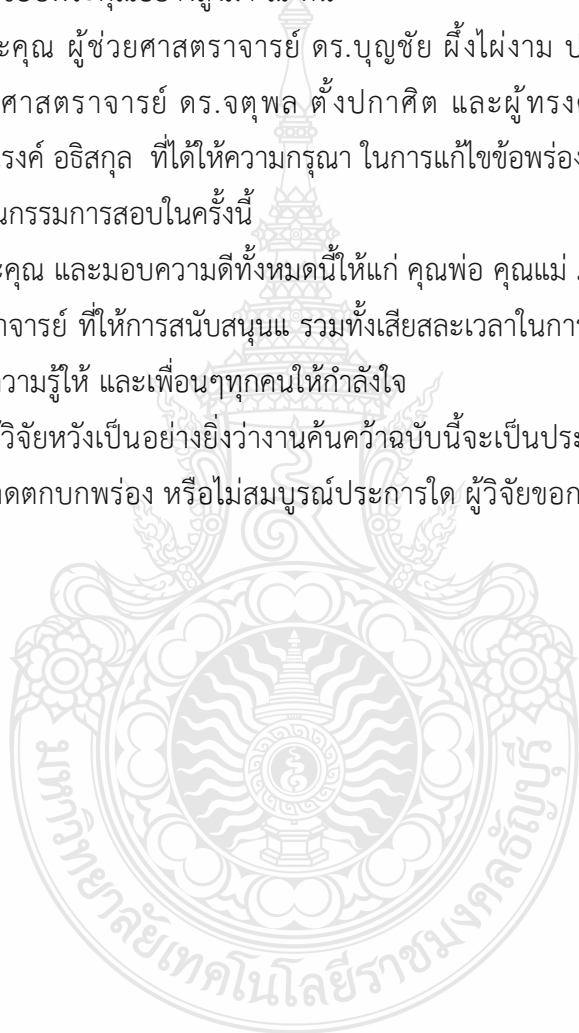
การศึกษา ค้นคว้า ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำธรเกียรติ มุสิเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม ประธานกรรมการสอบและกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต และผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยาและลูก พี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุน รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเพื่อนๆทุกคนให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานค้นคว้าฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากการค้นคว้าในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ยอดชาย สีพันดร



สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | (3) |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (5) |
| สารบัญ..... | (6) |
| สารบัญตาราง..... | (8) |
| สารบัญรูป..... | (9) |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 11 |
| 1.1 ความเป็นมาและสำคัญของปัญหา..... | 11 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 11 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 13 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... | 13 |
| 1.5 ข้อตกลงเบื้องต้นในการศึกษา..... | 13 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 13 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 15 |
| 2.1 ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก..... | 15 |
| 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการรับกำลังของคอนกรีต..... | 24 |
| 2.3 วิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต..... | 26 |
| 2.4 Size Effect Method..... | 29 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 31 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 36 |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ..... | 36 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ..... | 39 |
| 3.3 กระบวนการก่อนการใช้งาน..... | 40 |
| 3.4 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ..... | 40 |
| 3.5 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ..... | 41 |
| 3.6 มาตรฐานการทดสอบตัวอย่าง..... | 44 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล..... | 46 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.1 รูปแบบการวิบัติและพฤติกรรมของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่รูปทรงกระบอก..... | 46 |
| 4.2 รูปแบบของการวิบัติและพฤติกรรมการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่รูปทรงกระบอก..... | 48 |
| 4.3 รูปแบบของการวิบัติและพฤติกรรมของตัวอย่างคานคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีขนาดต่าง ๆ..... | 50 |
| 4.4 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆของกลศาสตร์การแตกหัก..... | 54 |
| 4.5 ตัวเลขความเปราะ..... | 56 |
| 4.6 Size effect curve..... | 57 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 59 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 59 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 59 |
| บรรณานุกรม..... | 61 |
| ภาคผนวก..... | 64 |
| ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบของตัวอย่าง..... | 65 |
| ภาคผนวก ข. ผลงานรอตีพิมพ์เผยแพร่..... | 67 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 84 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต..... | 40 |
| ตารางที่ 4.1 แรงกดสูงสุดของคานตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ..... | 54 |
| ตารางที่ 4.2 ผลของ Linear Regression..... | 56 |
| ตารางที่ 4.3 ผลของพารามิเตอร์การแตกหัก..... | 56 |
| ตารางที่ 4.4 ผลของตัวเลขความเปราะ..... | 57 |
| ตารางที่ ก1 กำลังรับแรงอัดประลัย..... | 66 |
| ตารางที่ ก2 กำลังรับแรงดึงแยกประลัย..... | 66 |
| ตารางที่ ก3 ผลของความเค้นระบุมของคานมีรอยบากกึ่งกลาง..... | 66 |



สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 ลักษณะตัวอย่างของมวลรวมหยาบรีไซเคิล..... | 12 |
| รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทวัสดุ..... | 17 |
| รูปที่ 2.2 รูปแบบการเสียดรูปที่ปลายรอยร้าว..... | 18 |
| รูปที่ 2.3 ความแข็งแรงของเส้นใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ..... | 20 |
| รูปที่ 2.4 การกระจายความเค้นบนแผ่นแบนที่มีรู (a) รุกกลม (b) รูวงรี..... | 20 |
| รูปที่ 2.5 แผ่นแบนขนาดอนันต์..... | 22 |
| รูปที่ 2.6 การลดทอนแรงขับเคลื่อนรอยร้าว..... | 23 |
| รูปที่ 2.7 การเชื่อมโยงพฤติกรรมของรอยร้าวในวัสดุต่างชนิดกันด้วยพารามิเตอร์..... | 24 |
| รูปที่ 2.8 อัตราน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อความสามารถเท่าใด..... | 25 |
| รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่อัตราการให้น้ำหนักที่ต่างกัน..... | 26 |
| รูปที่ 2.10 การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดประลัย..... | 27 |
| รูปที่ 2.11 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกประลัย..... | 28 |
| รูปที่ 2.12 การทดสอบแรงกดแบบ 3 จุด..... | 29 |
| รูปที่ 2.13 กราฟ Size-Effect บน Logarithmic Scale..... | 30 |
| รูปที่ 3.1 ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1..... | 36 |
| รูปที่ 3.2 มวลรวมละเอียด..... | 37 |
| รูปที่ 3.3 มวลรวมหยาบปกติ..... | 37 |
| รูปที่ 3.4 มวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่..... | 38 |
| รูปที่ 3.5 น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต..... | 38 |
| รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine..... | 39 |
| รูปที่ 3.7 แบบหล่อตัวอย่างคานแบบมีรอยบาก..... | 39 |
| รูปที่ 3.8 การทำให้อยู่สภาพอิมมัวผิวแห้ง..... | 40 |
| รูปที่ 3.9 ซากคอนกรีตเก่า..... | 41 |
| รูปที่ 3.10 การย่อยขนาดด้วยแรงงานคน..... | 41 |
| รูปที่ 3.11 เครื่องผสมคอนกรีต..... | 42 |
| รูปที่ 3.12 การเทคอนกรีตเทลงแบบหล่อ..... | 42 |
| รูปที่ 3.13 การบ่มกำลังด้วยน้ำ..... | 43 |
| รูปที่ 3.14 ตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่..... | 43 |
| รูปที่ 3.15 วิธีการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของตัวอย่าง..... | 44 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.16 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของตัวอย่าง..... | 44 |
| รูปที่ 3.17 วิธีการทดสอบแรงกดของตัวอย่างคาน..... | 45 |
| รูปที่ 4.1 การทดสอบแรงต้านทานแรงอัดประลัยของตัวอย่างรูปทรงกระบอก..... | 46 |
| รูปที่ 4.2 ตัวอย่างหลังจากถูกทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดประลัย..... | 47 |
| รูปที่ 4.3 การวิบัติของการทดสอบการต้านทานแรงอัด..... | 48 |
| รูปที่ 4.4 ผลของการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดประลัย..... | 48 |
| รูปที่ 4.5 การวิบัติด้วยการทดสอบกำลังแรงดึงแยกประลัย..... | 49 |
| รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกประลัย..... | 49 |
| รูปที่ 4.7 การทดสอบคานขนาดเล็กก่อนการวิบัติ..... | 50 |
| รูปที่ 4.8 การทดสอบคานขนาดเล็กหลังการวิบัติ..... | 51 |
| รูปที่ 4.9 การทดสอบคานขนาดกลางก่อนการวิบัติ..... | 52 |
| รูปที่ 4.10 การทดสอบคานขนาดกลางหลังการวิบัติ..... | 52 |
| รูปที่ 4.11 ตัวอย่างคานคอนกรีตขนาดใหญ่ขณะทดสอบ..... | 53 |
| รูปที่ 4.12 ตัวอย่างคานคอนกรีตขนาดใหญ่หลังทดสอบ..... | 53 |
| รูปที่ 4.13 แรงกดเฉลี่ยของคานตัวอย่าง..... | 54 |
| รูปที่ 4.14 Linear Regression ของตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้การแทนที่ร้อยละ 50..... | 55 |
| รูปที่ 4.15 Linear Regression ของตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้การแทนที่ร้อยละ 75..... | 55 |
| รูปที่ 4.15 Linear Regression ของตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้การแทนที่ร้อยละ 100..... | 56 |
| รูปที่ 4.16 Size Effect Curve..... | 58 |

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาของปัญหา (Background and Statement of The Problem)

ผลกระทบจากปัญหาสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญลานีญาและสภาวะโลกร้อน-ซึ่งส่งผลให้มนุษย์ต้องประสบภัยธรรมชาติสร้างความสูญเสียให้กับชีวิตและทรัพย์สินอย่างมากมาหลายทศวรรษ ทำให้มนุษย์ต้องตระหนักและช่วยกันคิดที่จะพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ ที่จะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือที่รู้จักกันในชื่อเทคโนโลยีสีเขียว (Green Technology)

คอนกรีต ได้ถูกค้นคิดและถูกนำมาใช้อย่างต่อเนื่องและยาวนานในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructures) มากที่สุดในปัจจุบันด้วยเหตุผลหลายอย่าง ข้อดีที่สำคัญที่สุดคือเรื่องของราคาและความคงทนเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ณ วันนี้ ปริมาณคอนกรีตที่ถูกทิ้งหรือถูกทิ้งทำลาย เพื่อต้องการก่อสร้างใหม่หรือการขยายปรับปรุงโครงการเก่าๆ มีจำนวนมากตามไปด้วย ตั้งแต่อดีตการกำจัดเศษซากคอนกรีตเก่าเหล่านั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น นำไปถมพื้นที่ รวมไปถึงมีแนวความคิดที่พยายามนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเรียกว่าคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete, RAC) ซึ่งจะสามารถช่วยลดปัญหาการขาดแคลนมวลรวมหยาบในอนาคต ลด CO₂ ที่เกิดตามมาจากกระบวนการขนส่งวัสดุ ลดมลพิษทางดินจากการใช้ซากคอนกรีตนำไปถมพื้นที่ ปลุกจิตสำนึกที่มีการหมุนเวียนนำขยะกลับมาใช้ใหม่และใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้คุ้มค่า

งานวิจัยนี้จะศึกษาการนำมวลรวมหยาบจากเศษซากอาคารเก่า (Residual Concrete) มาใช้งานใหม่อีกครั้ง โดยการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลและศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลรวมทั้งพารามิเตอร์การแตกหัก (Fracture Parameters) โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate, RA) แทนที่ด้วยมวลรวมหยาบปกติในอัตราส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่า [1] และมีความเป็นไปได้สำหรับการใช้จริงในอนาคตอันใกล้นี้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratios) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 0.55, 0.60, และ 0.65 ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย (Purpose of The Study)

งานวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจุดมุ่งหมายในอนาคตคือการพัฒนาคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถนำไปสู่การไปใช้งานก่อสร้างที่เป็นโครงสร้างรองทั่ว ๆ ไป ได้แก่ ลานจอดรถ พื้นทางเท้า เป็นต้นได้อย่างปลอดภัยและคงทน โดยมีวัตถุประสงค์หลักๆ ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวม
หยาบรีไซเคิล

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต
มวลรวมหยาบรีไซเคิล

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การแตกหักของ
คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

1.2.4 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio) ที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตมวล
รวมหยาบรีไซเคิลโดยจะพิจารณาทางด้านความแข็งแรง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย (Scope of Study)

งานวิจัยนี้จะศึกษาการนำมวลรวมหยาบจากเศษซากอาคารเก่า (Residual Concrete) มาใช้
เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลโดยการแทนที่มวลรวมหยาบปกติ (Normal
Aggregates, NA) ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate, RA) รวมทั้งจะศึกษาผลกระทบ
ของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และวิธีลดปัญหาเรื่องความสามารถในการเทได้จากการดูดซึมน้ำที่มากของ
มวลรวมหยาบรีไซเคิลอันเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิล

โดยมีการกำหนดขอบเขตของการวิจัย หลักๆดังต่อไปนี้

1.3.1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม 15

1.3.2 อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ (W/C Ratio) คือ 0.55, 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ
มวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้นจะถูกแทนที่มวลรวมหยาบปกติในปริมาณร้อยละ 50

1.3.3 มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ได้จากซากคอนกรีตอาคารเก่าที่ไม่ใช้งานแล้ว
โดยใช้แรงงานคนในการย่อยขนาดให้มีขนาดโตสุดไม่เกิน 20 มิลลิเมตร

1.3.4 ทรายหยาบที่ใช้สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป

1.3.5 มวลรวมหยาบปกติที่ใช้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป โดย
มีขนาดโตสุดไม่เกิน 20 มิลลิเมตร

1.3.6 ตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10
เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร จะถูกทดสอบเพื่อกำกำลังรับแรงอัดกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต
มวลรวมหยาบรีไซเคิล ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

1.3.6 ตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย คาน
คอนกรีตที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีความคล้ายคลึงกัน โดยมีจำนวน 3 ขนาด ซึ่งมีมิติของคานดังนี้
(กว้าง x ยาว x สูง) คานขนาดเล็ก 6x20x7.5 เซนติเมตร คานขนาดกลาง 6x40x15 เซนติเมตร และคาน
ขนาดใหญ่ 6x80x30 เซนติเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะถูกทดสอบที่

อายุบ่มน้ำ 28 วัน เพื่อหาแรงกดสูงสุดด้วยวิธีแบบแรงกด 3 จุด ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของ Size Effect Method เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของการแตกหักของคอนกรีต

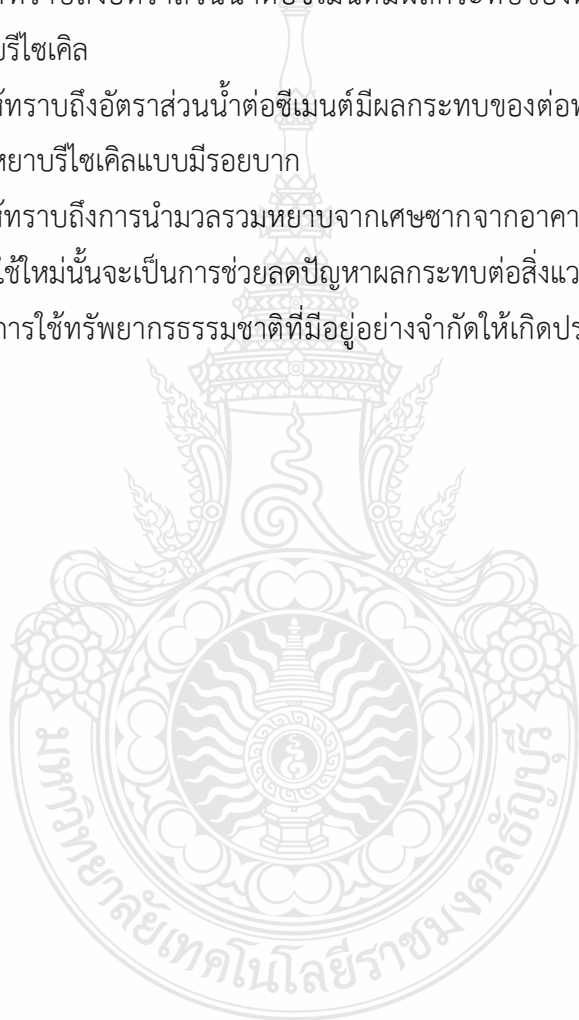
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ (Contribution to Knowledge)

1.4.1 ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

1.4.2 ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลกระทบของต่อกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

1.4.3 ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลกระทบของต่อพารามิเตอร์การแตกหักของคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบมีรอยบาก

1.4.4 ทำให้ทราบถึงการนำมวลรวมหยาบจากเศษซากจากอาคารเก่าที่เหลือจากการรื้อถอนหรือทุบทำลายกลับมาใช้ใหม่นั้นจะเป็นการช่วยลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดขยะก่อสร้าง และยังเป็น การลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดให้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Review of The Literature)

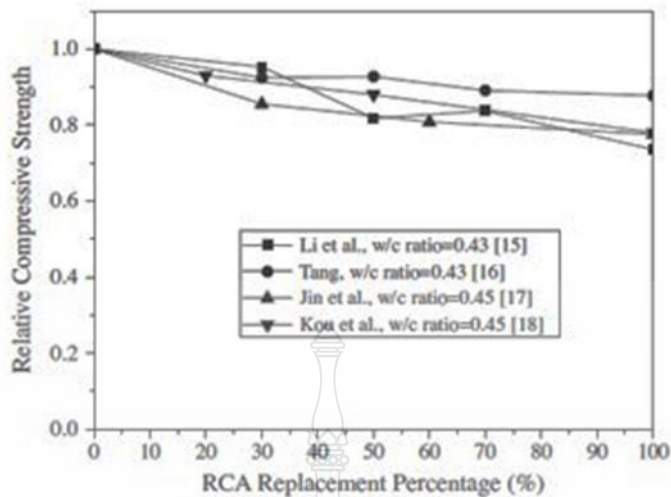
บทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและผ่านมาบนพื้นฐานของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้แทนที่มวลรวมหยาบปกติในงานคอนกรีตที่หลากหลาย ความเป็นมาของคอนกรีต ส่วนผสมของคอนกรีต ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหัก วิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต และวิธีการหาค่าพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงการนำมวลรวมหยาบรีไซเคิลมาใช้แทนที่มวลรวมหยาบปกติในคอนกรีตเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ที่ผ่านมามีคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้มีการศึกษาวิจัยโดยกลุ่มนักวิจัยในต่างประเทศหลายกลุ่มด้วยกัน โดยศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ส่วนการศึกษาวิจัยเรื่องคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลในประเทศไทยนั้น กลับพบว่าไม่มากนักเท่าที่ควรซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นลักษณะของการศึกษาคุณสมบัติทางกลเบื้องต้น

Li และคณะ [1] ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะขึ้นกับปริมาณของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้การแทนที่ปริมาณของมวลรวมหยาบปกติ ในกรณีที่ใช้ปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลไม่เกินร้อยละ 30 จะไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจน นอกจากนั้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลยังขึ้นอยู่กับคุณภาพคอนกรีตเดิมด้วย และจากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรีไซเคิลที่ลดลงเนื่องมาจากการเพิ่ม ปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อมวลรวมปกติ

Nagataki และคณะ [2] ได้ศึกษาความหนาแน่นของมวลรวมหยาบรีไซเคิล พบว่าจะต่ำกว่ามวลรวมหยาบปกติ เนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีซีเมนต์เพสต์เก่าหลงเหลือติดอยู่และความหนาแน่นนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตเก่าอีกด้วย ในขณะที่ Hansen และคณะ [3] ได้ศึกษาความหนาแน่นของมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อไปอีก ยังพบว่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบรีไซเคิลไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตเก่าเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับวิธีการบดหรือการบดด้วยเครื่องจักรและพลังงานที่ใช้จะส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลก็จะลดลงเช่นกันถ้าหากมีขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิลเล็กมาก



รูปที่ 2.1 อิทธิพลของปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อกำลังรับแรงอัด [4]

Musiket และคณะ [5] ได้ศึกษาอัตราความเร็วของแรงที่ใช้ทดสอบตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้พารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีค่าลดลงกว่าการทดสอบตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วคงที่

อภิรักษ์ มาตรนอก [6] ได้ศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบธรรมชาติและรีไซเคิลต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต โดยแบ่งสถานะความชื้นของมวลรวมหยาบเป็น 2 สถานะ คือ สถานะแห้งในอากาศและสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง และใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 100 โดยปริมาตร พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสถานะแห้งในอากาศมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิว โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่อยู่ในสถานะแห้งในอากาศ ส่วนกำลังอัดพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสถานะแห้งในอากาศ เนื่องจากใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่อยู่ในสถานะแห้งในอากาศ ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไม่ขึ้นกับสถานะความชื้นของมวลรวมหยาบโดยตรงแต่ขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต

นิริศ [7] ได้ศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตจากฝายกั้นน้ำเป็นมวลรวมหยาบ โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (F) ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และปริมาณอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.3 และ 0.5 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติเพียงเล็กน้อย เมื่อ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่า เท่ากับ 0.3 และมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานมีค่าสูง เท่ากับ 0.5 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสามารถช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้อย่าง
มีประสิทธิภาพ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรี
ไซเคิลที่อายุปม 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติ สำหรับทั้ง
W/B เท่ากับ 0.3 และ 0.5 เถ้าลอยไม่ได้เพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

เท็ดคักดี [8] ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากส่วนที่
เหลือของเสาเข็มคอนกรีต โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อย
ละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่ออายุการปม 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดประลัยลดลง
โดยเฉลี่ยร้อยละ 3.75, 17.02, 19.37 และ 30.40 ตามลำดับ และค่ากำลังตัดประลัยลดลงโดยเฉลี่ยร้อย
ละ 7.00, 16.54, 18.67, และ 32.48 ตามลำดับ โดยสรุปว่าคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีค่ากำลัง
อัดประลัยและกำลังตัดประลัยลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 30 และ 33 ตามลำดับ เมื่ออายุการปม 28 วัน

Nelson และคณะ [9] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิล พบว่ามี
ความแตกต่างจากมวลรวมหยาบปกติ อาทิเช่น มวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคม
และมีพื้นผิวที่หยาบมากกว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลปกติ จึงส่งผลให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นในการผสม
คอนกรีตและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด เนื่องจากผลกระทบมาจากรูปร่างและพื้นผิวของมวล
รวมหยาบรีไซเคิลในความสามารถในการเทได้ ส่วน Kou และ Shicong [10] ได้ศึกษาความสามารถในการ
ดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเช่นเดียวกัน ยังพบอีกว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของมวลรวม
หยาบรีไซเคิลจะสูงกว่ามวลรวมหยาบปกติ นั้น อันเนื่องมาจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีซีเมนต์เพสต์เก่า
หลงเหลือติดอยู่และยังขึ้นขนาดของมวลรวมอีกด้วย ถ้ามวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กก็ยิ่งส่งผล
กระทบต่อความสามารถในการดูดน้ำสูงกว่าที่มีขนาดใหญ่กว่าอีกด้วย

Rasheeduzzafar และ Khan A. [11] ได้ศึกษาความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตมวล
รวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยซากคอนกรีตเก่าต่าง ๆ พบว่าคอนกรีตมวลรวม
หยาบรีไซเคิลที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยซากคอนกรีตเก่ามีความสามารถในการเทได้นั้นต่ำกว่า
คอนกรีตธรรมดา

Kotrayothar และ Duangthidar [12] ได้ศึกษาความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม
หยาบรีไซเคิล พบว่าจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบปกติ เนื่องมาจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมี
ซีเมนต์เพสต์เก่าหลงเหลือติดอยู่จึงผลกระทบให้มีปริมาณของช่องว่างในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ทำให้ความ
หนาแน่นลดลงประมาณร้อยละ 5 และความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลงร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับ
คอนกรีตปกติ

Rahal K. [13] ได้ศึกษาคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล (RCA) เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยมีอายุที่ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลของตัวอย่างรูปทรงกระบอกและตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์กำลังรับแรงอัดจะลดลงเฉลี่ยร้อยละ 90 ของคอนกรีตปกติ และคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 250 – 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลงร้อยละ 3 ของคอนกรีตปกติ

Ravindrarahaj และคณะ [14] ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิล พบว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้นมีความแตกต่างกับมวลรวมหยาบปกติ โดยที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลจะความถี่จำเพาะลดลง และมีการดูดซึมน้ำมากกว่ามวลรวมหยาบปกติจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 25 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

Ravindra Gettu และ คณะ [15] ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตกำลังสูง (High strength concrete) ตามวิธี Size effect โดยทดสอบแบบแรงกด 3 จุด พบว่าคอนกรีตกำลังสูงจะมีการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 160 จะทำให้ความเหนียวของการแตกหัก (Toughness fracture) เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 25 ส่วนความยาวประสิทธิผลบริเวณรอบการแตกหักลดลงร้อยละ 60 และค่าตัวเลขความเปราะเมื่อค่าลดลงเป็นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กับคอนกรีตธรรมดา

Xiao และ Lan [16] ได้ศึกษากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล พบว่ากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเพิ่มขึ้นและแทนที่ร้อยละ 100 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะลดลงร้อยละ 30

Etxeberria และคณะ [17] ได้ศึกษาคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้มาจากซากคอนกรีตเก่าโดยใช้แทนที่มวลรวมปกติในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 ตามลำดับ และมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้จะทำให้อยู่ในสภาพเปียกแต่ไม่อิ่มตัวเพื่อควบคุมคุณสมบัติของคอนกรีตสดให้มีความสามารถในการเทได้ พบว่าส่งผลให้คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำและมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเช่นเดียวกัน

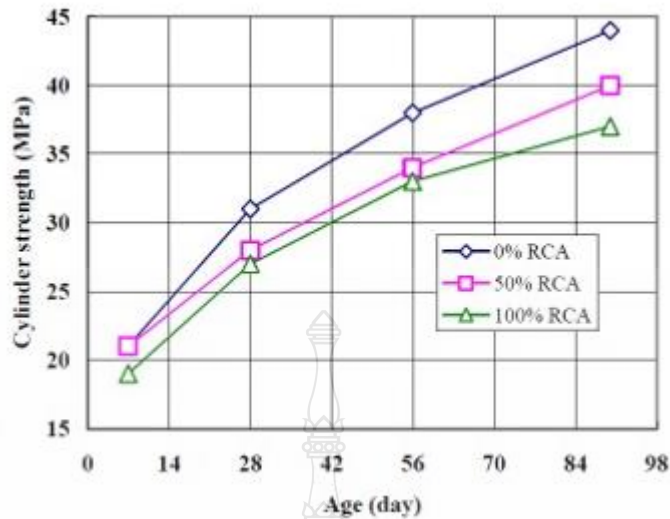
Domingo-Cabo และคณะ [18] ได้ศึกษาการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยการแทนที่ร้อยละ 20, 50 และ 100 ตามลำดับ พบว่าการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลจะเพิ่มขึ้นหลังจาก 180 วัน คล้ายกับคอนกรีตทั่วไปในระยะแรก อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อัตราการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลร้อยละ 100 พบว่าคอนกรีตรีไซเคิลมีการหดตัวจะสูงขึ้นร้อยละ 70 และมีการคืบร้อยละ 51 เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป

Fraaij และคณะ [19] ได้ศึกษาการคืบของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลโดยการแทนที่ร้อยละ 50 และ 100 ตามลำดับ พบว่าการคืบของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลจะเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าของเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป

ชุตติพงศ์ [20] ได้ศึกษากำลั้งอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบาเป็นวัสดุมวลรวมเอียงด ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คืออัตราส่วน ระหว่าง ปูนซีเมนต์ : มวลรวมละเอียด : มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1 : 2 : 4 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกระทำที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ กำลังอัดของคอนกรีตแปรผกผันกับค่าการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมหยาบจากการขัดสีด้วยวิธีลอสแองเจลีส

อลงกต [21] ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงเร็วโดยใช้วัสดุมวลรวมหยาบรีไซเคิลในการแทนที่มวลรวมหยาบปกติร้อยละ 50 ออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เริ่มต้นเท่ากับ 0.3 ส่วนผสมคอนกรีตจะผสมกับสารลดน้ำอย่างแรง (SikaViscoCrete-10) เพื่อคอนกรีตทดสอบมีค่าการยุบตัวระหว่าง 7 ถึง 10 เซนติเมตร นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาอิทธิพลของสารเร่งการก่อตัว (SikaRapid-1) ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิล พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถใช้เป็นคอนกรีตกำลังสูงเร็วและคอนกรีตกำลังสูง และมีกำลังอัดที่อายุบ่ม 24 ชั่วโมง และ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ เนื่องจากมวลรวมรีไซเคิลมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า จึงส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ประสิทธิภาพต่ำกว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบผสมระหว่างมวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลรวมหยาบธรรมชาติมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ เนื่องจากมอร์ต้าที่เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบมีความแข็งแรงต่ำสารเร่งการก่อตัวแทบไม่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลและคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ

Ravindrarah และคณะ [22] ได้ศึกษาคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้ปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อมวลรวมหยาบปกติร้อยละ 50 และ 100 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่าเมื่ออายุที่ 28 วัน กำลังรับแรงอัดจะลดลงร้อยละ 5.4 และ 8.9 ตามลำดับ และอายุที่ 90 วัน กำลังรับแรงอัดจะลดลงร้อยละ 7 และ 12 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลมีผลกระทบต่อการพัฒนาในอนาคต ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่ออายุการบ่ม [22]

2.2 นิยามของคอนกรีต (Concrete Definition)

คอนกรีต (Concrete) เป็นสิ่งมนุษย์สร้างขึ้นมีลักษณะคล้ายหิน ซึ่งคำว่า “คอนกรีต” มาจากภาษาลาตินแปลว่าการเติบโตที่เกิดจากการรวมตัว [23] คอนกรีตเป็นวัสดุผสมซึ่งประกอบด้วยหลักๆ ด้วยกัน 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก คือ วัสดุมวลรวมจะทำหน้าที่เป็นวัสดุเฉื่อย (Inert) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต ได้แก่ ทราย หิน และส่วนที่สอง คือ ปูนซีเมนต์กับน้ำและน้ำยาผสมจะทำหน้าที่ตัวยึดประสานและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างมวลรวม เมื่อแข็งตัวจะจับตัวเป็นก้อนในที่สุด ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลกในการก่อสร้าง เนื่องจากมีข้อได้เปรียบมากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ อาทิ เช่น ด้านราคาที่ถูกกว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวประมาณ $0.000006 \text{ นิ้ว/นิ้ว/}^{\circ}\text{F}$ ด้านความคงทนสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศ ความร้อนเนื่องจากคอนกรีตไม่นำความร้อน และสามารถสร้างรูปทรงและขนาดต่าง ๆ ตามความต้องการได้เมื่อแข็งตัว เป็นต้น [24]

2.2.1 องค์ประกอบหลักของคอนกรีต มีดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาวัสดุอย่างแรก คือ วัสดุธาตุปูน (Calcareous Material) ซึ่งเป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม (Calcium) และวัสดุอย่างที่สองเป็นวัสดุจำพวกอาซิลลาเซียส (Argillaceous Material) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (Silicon) และอลูมิเนียม (Aluminum) ซึ่งได้แก่ ดินเหนียว และหินชนวน (Slate) ด้วยการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 1,400 - 1,450 องศาเซลเซียส จากนั้นนำปูนเม็ดที่ได้จากการเผามาบดร่วมกับยิปซั่มในหม้อบดปูนซีเมนต์ (Cement Mill) [24] จะทำหน้าที่ให้กำลังของคอนกรีต โดยมีลักษณะเป็นผง

ละเอียดสีเทาหรือเทาเข้ม จะมีอนุภาคเล็กมากใน 1 กิโลกรัมจะมีอนุภาคมากถึง 1.1×10^{12} อนุภาค และความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 3.05 ถึง 3.20 โดยเฉพาะยังมีความละเอียดมากจะทำให้พื้นที่ผิวมากทำให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นส่งผลให้ได้กำลังอัดเร็วขึ้น ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าการยุบตัวจะลดลง เนื่องจากปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ซึ่งสามารถก่อตัวและแข็งตัวเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ที่เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.15) หรือตามมาตรฐานของ ASTM C150 ซึ่งสามารถแบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท คือ

ประเภทที่หนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) จะใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะให้กำลังสูงในระยะเวลานานและให้ความร้อนปานกลาง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร เป็นต้น

ประเภทที่สอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีความทนต่อการกัดกร่อนจากพวกเกลือซัลเฟตและให้ความร้อนปานกลาง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร เป็นต้น

ประเภทที่สาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก เนื่องจากมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคสีแดง เป็นต้น

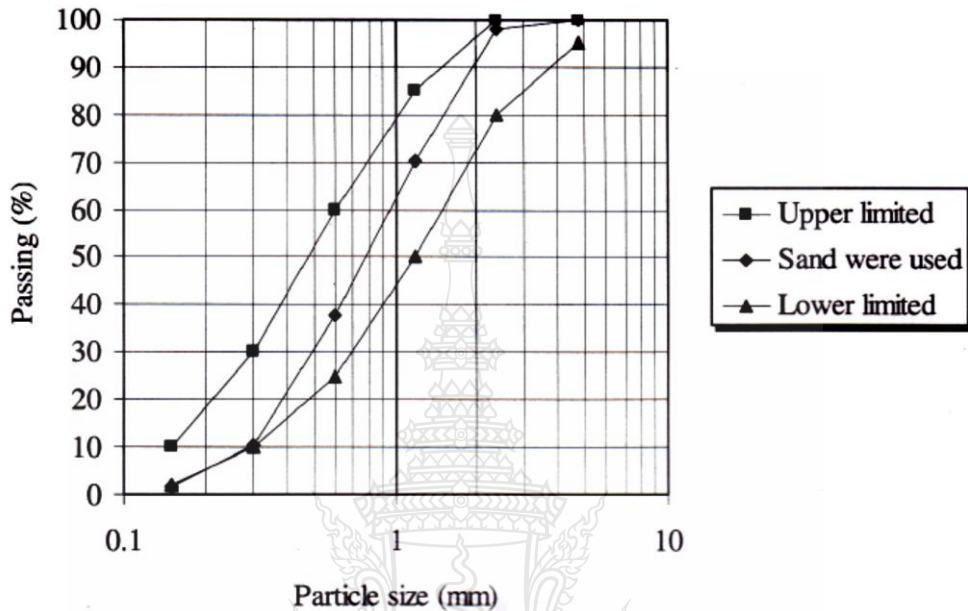
ประเภทที่สี่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำมาก ซึ่งเหมาะในการก่อสร้างคอนกรีตหลาย

ประเภทที่ห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตสูง (Sulfate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์พัฒนาสำหรับใช้ในพื้นที่ที่มีซัลเฟตสูง [25]

2. น้ำผสมคอนกรีต น้ำมีความสำคัญต่อกำลังของคอนกรีตเป็นอย่างมาก คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ต้องมีความสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรด ด่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต ปกติน้ำประปาและน้ำจัดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ที่สามารถบริโภคได้ ถือว่าคุณภาพดีพอสำหรับงานคอนกรีต [24]

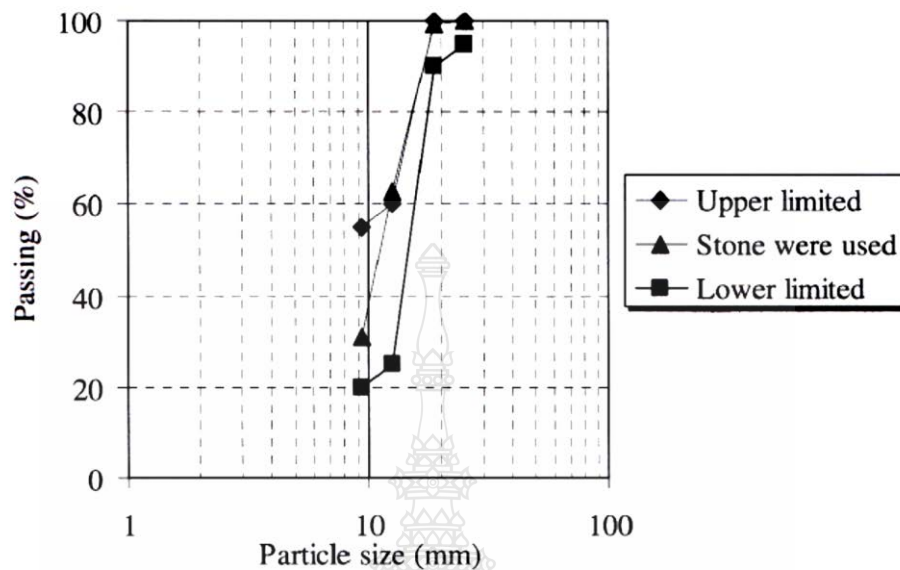
3. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregates) จะทำหน้าที่เป็นส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเป็นตัวแทรกระหว่างมวลหยาบซึ่งจะเป็นวัสดุเฉื่อย (วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์) มีขนาดเล็กเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 ประมาณ 95 - 100% ดังในรูปที่ 2.3 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus , F.M.) เท่ากับ 2.20 - 3.20 ซึ่งหาได้จากวิเคราะห์ด้วยตะแกรง

มาตรฐาน โดยการนำค่าร้อยละค้ำงสะสมของน้ำหนักที่ค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 4 – 100 มารวมกันแล้วหารด้วย 100 ได้แก่ ทรายแม่น้ำ (River Sand) และทรายบก (Pit Sand) [25]



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของขนาดคละของมวลละเอียด [25]

4. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) เนื่องจาก 70 – 80% ของปริมาตรคอนกรีตของส่วนผสมทั้งหมดจะเป็นมวลรวม จึงมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก ได้แก่ หินหรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตร ขึ้นไป หรือค้ำงอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ประมาณ 95 - 100% ซึ่งจะมีขนาดคละตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C33 ดังในรูปที่ 2.4 และมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) เท่ากับ 5.50 – 5.70 ซึ่งหาได้จากวิเคราะห์ด้วยตะแกรงมาตรฐานโดยการนำค่าร้อยละค้ำงสะสมของน้ำหนักที่ค้ำงบนตะแกรงเบอร์ $1\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{3}{8}$ และเบอร์ 4 มารวมกันและบวก 500 แล้วหารด้วย 100 นอกจากนี้มวลรวมต้องมีขนาดคละกันอย่างดีและลักษณะรูปร่างต้องมีผิวหยาบเป็นเหลี่ยม แบน ยาว ไม่ควรเกิน 15% ของมวลรวมปกติ เพื่อช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างกันน้อย ทำให้เปลืองซีเมนต์เฟสต์ ขนาดโตสุดของหินโดยปกติขนาดโตสุดไม่เกิน $\frac{1}{5}$ ของด้านที่แคบที่สุดของแบบหล่อ หรือ $\frac{1}{3}$ ของความหนาของแผ่นพื้น และ $\frac{3}{4}$ ของระยะช่องว่างที่น้อยที่สุดระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้น เพราะอาจจะเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตไม่แน่นตัวและเกิดรูพรุนหรือโพรงได้ [25]



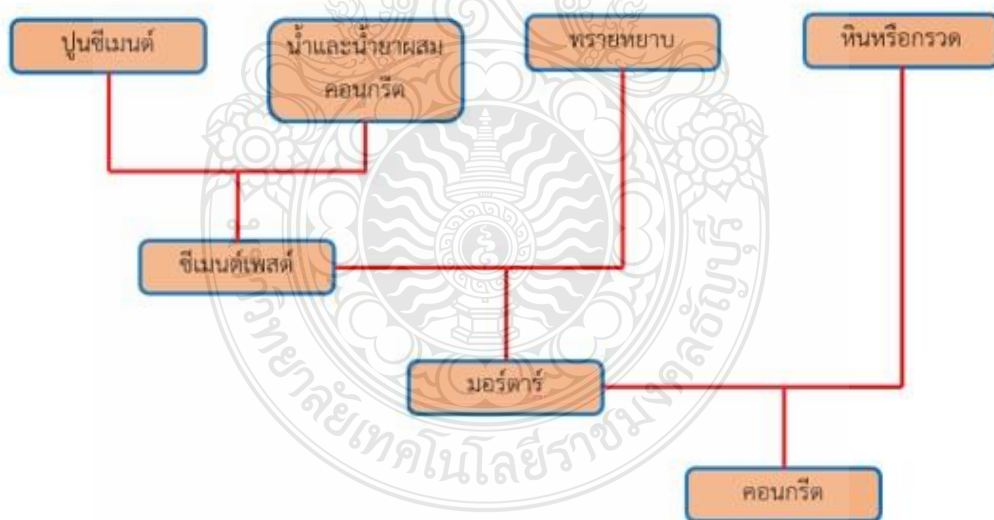
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของขนาดคละของมวลรวมหยาบ [25]

2.2.1.5 สารผสมเพิ่ม (Admixture) หมายถึง สารเคมีที่ใช้ผสมคอนกรีตเพื่อจุดประสงค์เพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีต ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 733 ได้แบ่งสารเคมีผสมเพิ่มออกเป็น 8 ประเภท ดังนี้ ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducers) เป็นสารเคมีผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณน้ำในคอนกรีตลงแต่ความสามารถในการเทได้คอนกรีตยังคงเดิม ประเภท B สารหน่วงการแข็งตัว (Retarders) เป็นสารเคมีผสมเพิ่มทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น ประเภท C สารเร่งการก่อตัว (Accelerators) เป็นสารเคมีผสมเพิ่มทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น ประเภท D สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water Reducing and Set Retarding Admixtures) เป็นสารเคมีผสมเพิ่ม ทำให้ความสามารถในการเทได้คงเดิมแต่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น ประเภท E สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water Reducing and Set Accelerating Admixture) เป็นสารเคมีผสมเพิ่มทำให้ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิมและทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น ประเภท F สารลดน้ำระดับสูง (High Range Water Reducing Admixtures) เป็นสารผสมเคมีเพิ่มสามารถลดน้ำอย่างน้อยร้อยละ 12 โดยทำให้ความสามารถในการเทได้ยังคงเดิม ประเภท G สารลดน้ำระดับสูงและหน่วงการแข็งตัว (High Range Water Reducing and Set Retarding Superplasticizer) เป็นสารเคมีผสมเพิ่มทำให้สามารถปริมาณน้ำอย่างน้อยร้อยละ 12 โดยทำให้ความสามารถในการเทได้

ยังคงเดิมและทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น ประเภทอื่น ๆ เป็นสารเคมีผสมเพิ่ม เพื่อป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม สารกันซึม สารกักกระจายฟองอากาศ เป็นต้น [26]

2.2.2 องค์ประกอบและการจำแนกประเภทของคอนกรีต

ขั้นตอนในกระบวนการผลิตคอนกรีตมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ด้วยกัน 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก เมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมน้ำและน้ำยาผสมเพิ่มมาผสมรวมกันจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) หลังทำปฏิกิริยาทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ส่วนที่สองที่เกิดจากซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ตาร์ (Mortar) และส่วนสุดท้ายที่เกิดจากมอร์ตาร์ผสมกับหินหรือกรวด จะเรียกว่า คอนกรีต (Concrete) โดยมีกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 2.5 ส่วนชนิดของคอนกรีตสามารถแบ่งโดยใช้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ ได้แก่ คอนกรีตทั่วไป (Normal Weight Concrete) เป็นคอนกรีตใช้สำหรับโครงสร้างทั่วไป โดยมีหน่วยน้ำหนัก 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คอนกรีตเบา (Light Weight Concrete) เป็นคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างฉนวนกันความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดน้ำหนักโครงสร้างอาคาร โดยมีหน่วยน้ำหนัก 300-1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และคอนกรีตหนัก (Heavy Weight Concrete) เป็นคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างที่ป้องกันรังสีหรือกัมมันตภาพรังสี โดยมีหน่วยน้ำหนัก 3,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตคอนกรีต

2.2.3 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตเป็นการนำปูนซีเมนต์ น้ำ สารผสมเพิ่ม หิน และทราย เป็นการนำส่วนผสมเหล่านั้นมาทำให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอจะมีวิธีการผสมด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่

2.2.3.1 ผสมด้วยมือ เหมาะสมกับงานไม่เคร่งครัดกับคุณภาพของคอนกรีตมากนักเพราะว่า จะมีปัญหาความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีต โดยจะนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาผสมกับทรายก่อนมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันก่อน หลังจากนั้นจึงเกลี่ยส่วนผสมออกเป็นวงกลม คล้ายปากปล่องภูเขาไฟแล้วนำหินมาตักใส่ด้วยพลั่วตรงบริเวณกลาง ค่อยๆ โรยน้ำใส่ลงไปให้ทั่วแล้วสั๊กพักให้น้ำค่อยๆ ซึมลงไป สุดท้ายผสมส่วนผสมทั้งหมดคลุกเคล้าให้เข้ากันอีกครั้งพร้อมกับเติมน้ำในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ควรใช้ให้หมดภายใน 30 นาที นับตั้งแต่เติมน้ำ [26]

2.2.3.2 ผสมด้วยเครื่องผสม จะทำให้ส่วนผสมเข้ากันอย่างสม่ำเสมอและยังลดเสียงคอนกรีตออกเครื่องผสมโดยไม่ทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว การผสมจะโดยอาศัยการหมุนด้วยใบพายและมีมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์เป็นต้นกำเนิดพลังงานเพื่อควนส่วนผสมให้เข้ากัน ระยะเวลาการผสมขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเครื่องผสม ตามคำแนะนำของ ACI 304-78 และ ASTM C 94-8 เครื่องผสมที่นิยมใช้เป็นแบบไม่ผสมชนิดเอียง มีการออกแบบสำหรับการผสมต่อปูนซีเมนต์ครึ่งละ 1 ถุง โดยมีชั้นคร่าวๆ ดังนี้ เริ่มต้นจากการเติมน้ำประมาณร้อยละ 20 ของน้ำที่ต้องการ หลังจากนั้นนำมวลรวมใส่ไม่แล้วตามด้วยปูนซีเมนต์ซึ่งจะค่อยๆ เติมน้ำส่วนที่เหลือ ก็จะได้เป็นคอนกรีต [26]

2.2.3.3 คอนกรีตผสมเสร็จ (Ready Mixed Concrete) เป็นคอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยจากโรงงาน ใช้การลำเลียงขนส่งด้วยบรรทุก ขนาดความจุ 3 – 5 ลูกบาศก์เมตร ไม่จะหมุนระหว่างการเดินทางเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน [26]

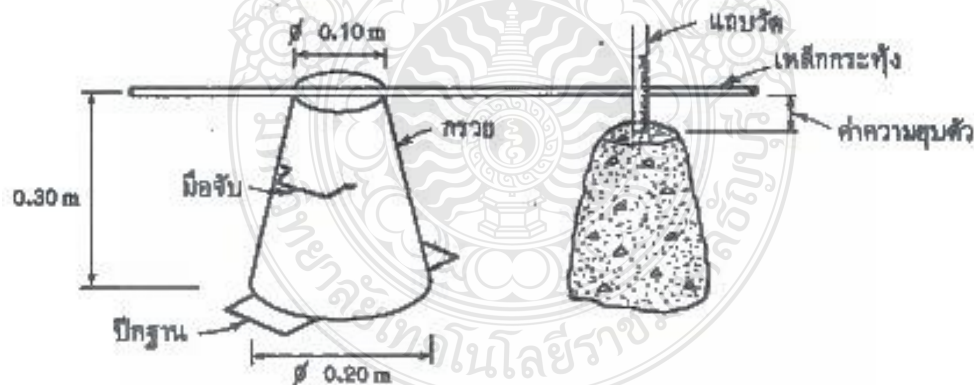
2.2.4 ส่วนผสมของคอนกรีต

การกำหนดส่วนผสมของคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความชื้นเหลว (Consistency) และสะดวกต่อการทำงาน (Workability) สามารถไหลลงแบบหล่อและหุ้มท่อเหล็กเสริมได้ดีโดยไม่เกิดการแยกตัวหรือคายน้ำมากเกินไปและเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทาน (Durability) ต่อการใช้งานในสภาวะพิเศษอื่น (Special Exposure) เช่น คอนกรีตต้องสัมผัสกับสารละลายหรือดินที่มีซัลเฟต หรือที่ต้องสัมผัสกับน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล เป็นต้น [27] วิธีการทดสอบความชื้นเหลวของคอนกรีตเพื่อให้พอเหมาะสมในการเทที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การวัดการยุบตัว (Slump Test) ดังในรูปที่ 2.6 ถ้าเหลวเกินไปน้ำปูนกับหินทรายจะเกิดการแยกตัวโดยหินจะไปกองด้านล่างส่วนน้ำปูนและทรายจะลอยอยู่ด้านบนทำให้กำลังของคอนกรีตเกิดความไม่สม่ำเสมอจนเป็นสาเหตุให้แตกร้าวได้ง่าย และถ้าแบบหล่อมีรูรั่วจะทำให้ปูนทรายไหลออกเป็นเหตุให้คอนกรีตเกิดเป็นโพรงได้ ในทางตรงกันข้ามถ้าคอนกรีตมีความชื้นเกินไปจะทำให้ความสามารถในการเทได้ลดลงทำงานลำบากเป็นเหตุให้

คอนกรีตเกิดเป็นโพรงได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับการทำงานทั่ว ๆ ไปในประเทศไทย [28] ดังแสดงตารางที่ 2.5 ประเภทของสัดส่วนผสมโดยปริมาตร เหมาะสมกับกรณีสานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปที่ไม่ต้องการกำลังคอนกรีตสูงมาก อาจอาศัยข้อมูลหรือสถิติที่เคยปฏิบัติมาเป็นเกณฑ์ ดังตารางที่ 2.2 เช่น ใช้คอนกรีต 1 : 2 : 4 โดยปริมาตร สำหรับงานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งหมายถึงใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 และหิน 4 ส่วน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับประเภทงานก่อสร้างต่าง ๆ [29]

| ประเภทงานก่อสร้าง | ค่าการยุบตัว (ซม.) |
|-------------------------|--------------------|
| ฐานราก | 7.50 ± 2.50 |
| พื้นถนน | 7.50 ± 2.50 |
| แผ่นพื้น, คาน, ผนัง | 10.00 ± 2.50 |
| เสา | 10.00 ± 2.50 |
| งานคอนกรีตที่เทด้วยปั๊ม | 10.00 ± 2.50 |
| เสาเข็มเจาะระบบแห้ง | มากกว่า 15 |
| งานเทคอนกรีตใต้น้ำ | มากกว่า 15 |



รูปที่ 2.6 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต [28]

2.2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของคอนกรีต

คอนกรีตสามารถแบ่งออกได้ 2 สถานะ ได้แก่ สถานะแรกเป็นของเหลวหรือคอนกรีตสด (Fresh Concrete) และสถานะที่สองเป็นคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete) ซึ่งในแต่ละสถานะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อกำลังของคอนกรีตทั้งนั้นดังนี้

คอนกรีตสด คือ คอนกรีตที่ได้จากหลังจากผสมวัสดุต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วในช่วงแรกจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลวที่มีความหนืดต่ำโดยที่มวลรวมและปูนซีเมนต์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำจะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเปลี่ยนเป็นเหมือนของไหล ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงคุณภาพและมีผลต่อการทำงานโดยตรงของคอนกรีต ได้แก่ ความสามารถในการเทได้ (Workability) คือ ความง่ายและสะดวกของการเทคอนกรีตลงแบบและทำให้แน่นโดยที่ไม่ทำให้เกิดการแยกตัว การยึดเหนี่ยว (Cohesion) คือ การที่เนื้อคอนกรีตสามารถจับรวมตัวกันเป็นก้อนหรือแยกออกกันได้ง่าย ความชื้นเหลว (Consistency) คือ สภาพความเหลวของคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเป็นส่วนใหญ่ การแยกตัว (Segregation) คือ การแยกตัวออกของส่วนประกอบต่าง ๆ ในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ การเยิ้ม น้ำ (Bleeding) คือ การแยกตัวอีกชนิดหนึ่งโดยการแยกในแนวตั้งทำให้มวลรวมและปูนซีเมนต์จะจมอยู่ด้านล่างเนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่าส่วนน้ำจะลอยอยู่ผิวบนของคอนกรีต คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ของคอนกรีตสด จะส่งผลโดยตรงต่อกำลังและความคงทนของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว ซึ่งมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดดังนี้ [30]

1. ปริมาณน้ำในส่วนผสม

น้ำมีอิทธิพลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดโดยตรง การเพิ่มปริมาณน้ำทำให้คอนกรีตสดมีสภาพเหลว ทำให้การเทและอัดแน่นทำได้ง่าย แต่จะทำให้กำลังลดลงและทำให้เกิดการแยกตัวได้ง่ายเนื่องจากหินและทรายจะจมสู่ด้านล่างได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ขณะที่น้ำจะลอยอยู่ด้านบนในทางกลับกันถ้ามีปริมาณน้ำผสมอยู่น้อยไปจะทำให้คอนกรีตสดแห้ง กระด้าง ตลอดจนการทำให้คอนกรีตแน่นยากขึ้น [30]

2. คุณสมบัติของมวลรวม

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมที่กลมจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุมเพราะมีพื้นที่สัมผัสมากกว่าทำให้มีความต้องการน้ำและซีเมนต์มากขึ้น และมวลรวมที่มีความพรุนสูงจะมีการดูดน้ำซึ่มมากทำให้เกิดการยุบตัวเร็วขึ้น [29]

3. ชนิดของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นจะส่งผลให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาได้รวดเร็ว แต่ความสามารถเทได้ของคอนกรีตคอนกรีตจะลดลง [30]

4. เวลาและอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตลดลง เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้น้ำเกิดระเหยไปอย่างรวดเร็ว [30]

5. สารผสมเพิ่ม

โดยการใส่สารหน่วงการก่อตัว สารกักฟองอากาศ และสารลดน้ำจะเพิ่มช่วยความสามารถเทได้ของคอนกรีต ในทางกลับกันจะทำให้กำลังอัดในช่วงต้นมีค่าที่ต่ำลง [30]

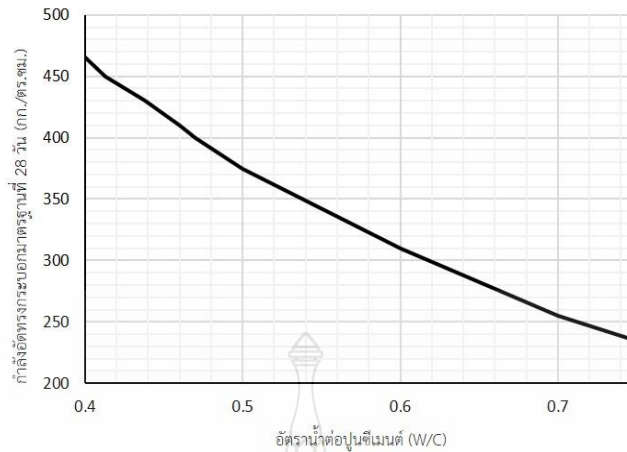
คอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete) ซึ่งเป็นสถานะที่คอนกรีตจะถูกนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามความต้องการที่ถูกออกแบบไว้สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น กำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) และทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดหลายปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้วดังนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water Cement Ratio)

โดยทั่วไปคอนกรีตทั่ว ๆ ไปอาจมีค่า W/C อยู่ในช่วง 0.5 – 0.8 หรือ อาจจะต่ำในระดับ 0.2-0.3 สำหรับคอนกรีตคุณภาพสูง ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.8 ซึ่งกำลังของคอนกรีตจะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เมื่อปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำจะมีการรับกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูง แต่จะพบว่าจะปัญหาในการทำงานโดยเฉพาะการทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นและจะเกิดการหดตัวสูง (Shrinkage) ในทำนองเดียวกันถ้าหากปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง เนื่องจากน้ำส่วนที่เหลือ (Excess Water) จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) และเกิดโพรง (Honey Comb) หรือช่องว่างในเนื้อคอนกรีตซึ่งมีผลเสียต่อกำลังอัดและความทนทาน ข้อดีของปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คือ ง่ายในการทำงานและสะดวกในการทำให้แน่น [26]

2. อายุของคอนกรีต

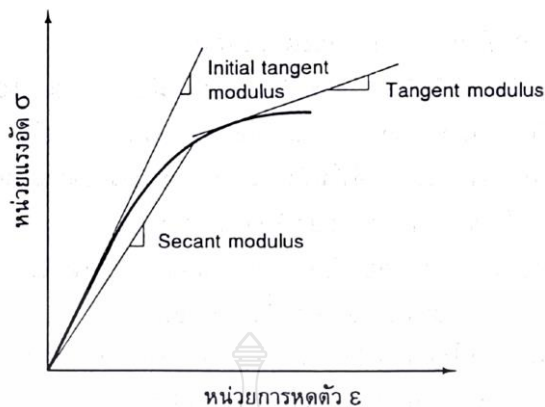
คอนกรีตจะพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีน้ำหรือความชื้นเพียงพอ กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกหลังจากการแข็งตัว แต่หลังจากอายุ 28 วัน กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง [29]



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดทรงกระบอกกับอัตราน้ำต่อซีเมนต์

3. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of Concrete ,Ec)

เป็นตัวบ่งหรือแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูป (Deformation) ของคอนกรีตเมื่อน้ำหนักหรือแรงกดกระทำ พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อกอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ อาจสมมติตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อกอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic Material) โดยมีหน่วยการหดตัว (Elastic Strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อกอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกค้ำเป็นเวลานาน (Long-term Loading) หรือเมื่อต้องรับน้ำหนักหรือแรงกระทำซ้ำซาก (Repeated Loading) เป็นวัฏจักร ต้องพิจารณารวมหน่วยด้วยการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Strain) หรือที่มักเรียกกันว่าหน่วยการล้าของคอนกรีต (Creep Strain) ด้วย เพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดน้อยลงตามลำดับ ทำให้คอนกรีตเกิดการเสียรูปมากขึ้นและจะมีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือแรงกระทำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อหน่วยการหดตัวของเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปเส้นสัมพันธ์นี้ลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลา แต่สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ตามวิธีการต่าง ๆ ดังนี้ [27]



รูปที่ 2.8 วิธีการหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต [27]

ก. Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัส ซึ่งได้จากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นให้สัมผัสกับเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวที่จุดเริ่มต้นนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธีการนี้เป็นค่าที่สมมติว่าคอนกรีตเสมือนเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic) เช่นเดียวกับเหล็ก โดยคิดว่าไม่มีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือแรงกระทำ นั่นคือ ไม่คิดการหดตัวแบบพลาสติกหรือการล้าของคอนกรีต

ข. Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใด ๆ ที่ต้องการหา (ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 40 หรือ 50 % ของหน่วยแรงอัดสูงสุด) บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เพราะเป็นค่าที่ได้รวมถึงการหดตัวแบบพลาสติกหรือการล้าของคอนกรีต

ค. Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตทุกระดับของหน่วยแรงอัด [27]

4. อัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีต (Poisson's Ratio)

อัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีต หมายถึง อัตราส่วนระหว่างหน่วยการยืดหดตัวทางด้านข้างต่อหน่วยการหดตัวตามแนวแกนที่รับน้ำหนักจากการทดสอบ เพื่อหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต รูปทรงกระบอกมาตรฐานพบว่า เมื่อคอนกรีตรับแรงอัดตามแนวแกนสูงมากขึ้นคอนกรีตจะขยายตัวออกทางด้านข้างมากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากการแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีตในแนวที่ขนานกับแรงที่กระทำ คอนกรีตทั่ว ๆ ไปจะมีค่าปัวซองส์เรโซอยู่ระหว่าง 0.15 – 0.25 หรือค่าเฉลี่ยประมาณ

0.17 เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นจะมีค่าปัวซองส์เรโซน้อยลง นั่นคือ เมื่อคอนกรีตมีกำลังสูงมากขึ้น ความเหนียวของคอนกรีตจะลดน้อยลง [27]

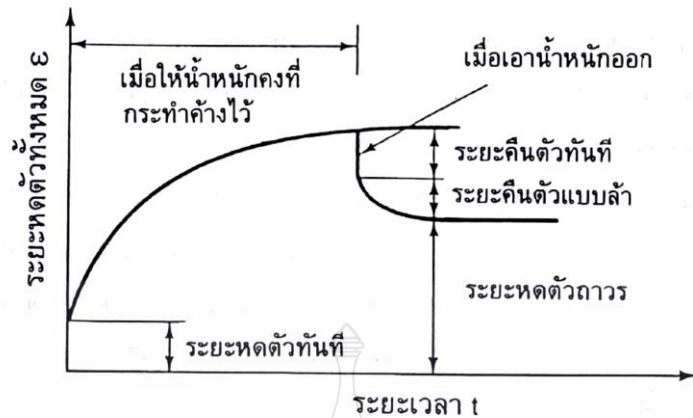
5. มวลรวม การใช้มวลรวมที่มีปริมาตร รูปร่าง ขนาด และส่วนคละต่างกันมีผลกระทบทางอ้อมต่อกำลังและความคงทนของคอนกรีต เช่น มวลรวมที่มีรูปร่างกลม ทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีกว่ามวลรวมที่มีผิวหยาบ รูปร่างเหลี่ยม และสามารถลดการใช้น้ำน้อยลงเมื่อเทียบความสามารถในการเทได้เท่ากับ ทำให้กำลังและความคงทนขึ้นเมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง แต่ในขณะเดียวกันยังมีผลกระทบทางลบจากการยึดเหนี่ยวที่ด้อยกว่ากรณีมวลรวมรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ เป็นต้น หากใช้สัดส่วนมวลรวมหรือ Aggregate Volume Fraction เพิ่มขึ้น หรือมวลรวมมีขนาดใหญ่ จะมีผลต่อการเพิ่มกำลังของคอนกรีต หรือแร่ธาตุบางชนิดในมวลรวมอาจ มีผลต่อความคงทนโดยเกิดการแตกร้าวในภายหลัง [30]

7. ขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

กำลังของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้จะต้องขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่างทดสอบ โดยที่ขนาดของแท่งทดสอบที่ใหญ่กว่าจะให้กำลังในรูปของหน่วยแรง น้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัดหรือความเค้นที่ต่ำกว่า เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีจุดอ่อนมากกว่า จุดอ่อนดังกล่าวได้แก่โพรงอากาศ รอยร้าวภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่เกิดจากการหดตัวหรือจุดอ่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบและซีเมนต์เพสต์ [30]

8. การล้าและการยึด-หย่อนของคอนกรีต

การล้า (Creep) เป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของคอนกรีตที่จะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดการเสียรูปทรง (Deformation) เช่น คานโค้งของคาน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.9 แสดงพฤติกรรมการล้าของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่น้ำหนักบรรทุกคงค้างกระทำ จะเห็นว่า เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักแรงที่กระทำจะเกิดการเสียรูปทรงหรือการหดตัวอย่างทันทีทันใด (Instantaneous Deformation) และเมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักกระทำคงค้างเป็นต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ๆ คอนกรีตจะหดตัวและเสียรูปทรงมากขึ้นเนื่องมาจากการล้านั่นเอง อัตราการล้าของคอนกรีตจะค่อยๆ ช้าลง เมื่อระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุกคงค้างเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จะพบว่าประมาณ 75% ของการล้าจะเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 6 เดือน และประมาณ 90% ของการล้าจะเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 1 ปี การล้าของคอนกรีตจะหยุดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 - 5 ปี [27]



รูปที่ 2.9 การล้าของคอนกรีต [27]

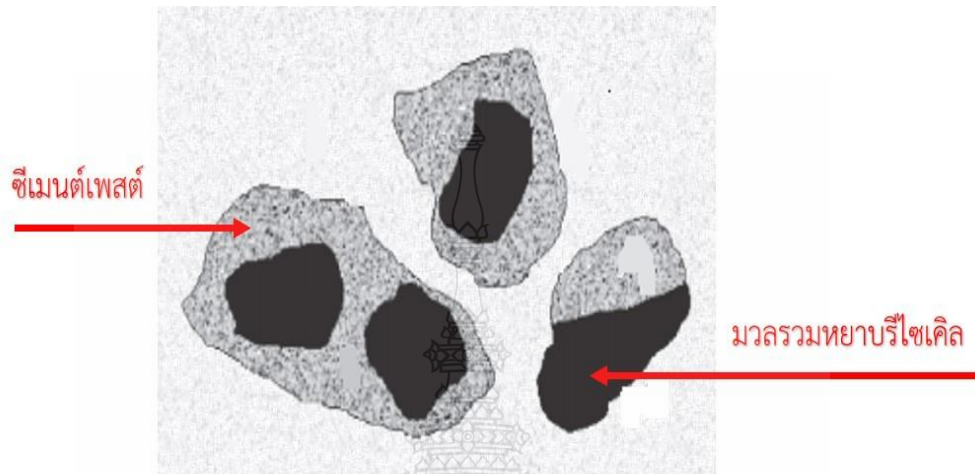
การยัด-หดตัว (Shrinkage) ของคอนกรีตเนื่องจากการเสียน้ำ เป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของคอนกรีตที่จะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดการเสียรูปทรง (Deformation) มากขึ้นตามกาลเวลา เช่นเดียวกันกับการล้า แต่การหดตัวของคอนกรีตในลักษณะนี้จะเกิดจากการสูญเสียความชื้นเนื่องจากการระเหยของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิที่คงที่ซึ่งจะทำให้ปริมาตรของคอนกรีตลดน้อยลง แต่เมื่อคอนกรีตได้รับความชื้นเพิ่มขึ้นจะพองหรือขยายตัวออกและมีปริมาตรเกือบเท่าเดิม ฉะนั้น ในสภาวะที่มีการแห้งและเปียกสลับกัน ปริมาตรของคอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [27]

9. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature Change) เมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงคอนกรีตจะเกิดการหดตัว ส่งผลทำให้ผิวคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าว ดังนั้น เพื่อป้องกันการยัดหดของคอนกรีตที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิและความชื้น ตามมาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. จึงกำหนดให้เสริมเหล็กต้านหดตัวซึ่งบางครั้งเรียกว่าเหล็กเสริมกันร้าว แต่ถ้าหากมีการบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอย่างต่อเนื่องในระยะแรกจะสามารถลดปัญหาดังกล่าวลงได้ [27]

2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่

มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ได้จากการย่อยซากคอนกรีตเก่านั้นอาจจะมีวิธีใช้แรงงานหรือเครื่องจักร มักจะพบว่าจะมีเศษมอร์ต้าของคอนกรีตเก่าเกาะหุ้มรอบมวลรวมหยาบ ดังรูปที่ 2.10 จึงมีผลทำให้ความแข็งแรงของมวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้นจะต่ำกว่ามวลรวมหยาบแบบธรรมชาติ นอกจากนี้ลักษณะรูปร่างมีความเป็นเหลี่ยมและมีมอร์ต้าที่เกาะหุ้มรอบมวลรวมหยาบนั้นทำให้มีความต้องการดูดซึมน้ำมากกว่ามวลรวมแบบธรรมชาติ จึงส่งผลต่อความสามารถในการเทของคอนกรีตลดลงไปด้วย

จำเป็นต้องกระบวนการก่อนนำไปใช้หลายประการ อาทิเช่น ทำให้มวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) หรือเคลือบผิวมวลรวมหยาบรีไซเคิลด้วยซิลิกาฟูม เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ลักษณะทางกายภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิล

2.4 ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture Mechanics)

กลศาสตร์การแตกหักเป็นแขนงหนึ่งของวิชากลศาสตร์วัสดุซึ่งศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่มีรอยร้าวหรือตำหนิ (Defect) เมื่อถูกความเค้นมากกระทำรอบบริเวณปลายรอยร้าว (Crack Tip) จะส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดการเสียรูปทรง (Deformation) มากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไปจึงมีโอกาสเสียหายก่อนบริเวณอื่น ๆ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อวัสดุทำให้เกิดรอยร้าว นั้น อาทิเช่น การรับภาระเกิน (Over Load) ความล้า (Fatigue) การคืบ (Creep) และการโก่งตัวอย่างไร้เสถียรภาพ (Buckling) เป็นต้น [31]

2.4.1 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Fracture Mechanics ,LFEM)

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Fracture Mechanics ,LFEM) เป็นการศึกษาการกระจายของความเค้นรอบบริเวณปลายรอยร้าวและความมีเสถียรภาพของรอยร้าว โดยที่วัสดุจะมีพฤติกรรมการเสียรูปทรงสอดคล้องกับกฎของฮุก (Hook's Law) หรือแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยอาศัยหลักเกณฑ์พื้นฐาน ได้แก่ หลักเกณฑ์พื้นฐานทางความเค้น (Stress Based) และหลักเกณฑ์พื้นฐานทางกฎทรงพลังงาน (Energy Based) [32]

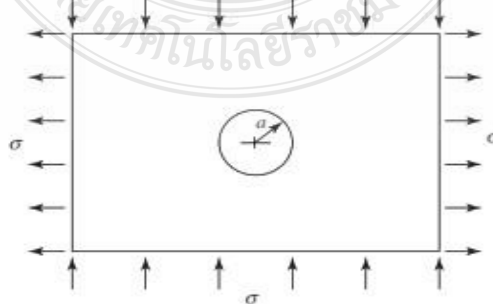
ความเค้นขุมขุม (Stress Concentration Factor) กลศาสตร์การแตกหักได้จากศึกษาผลของรูเจาะกลมหรือตำหนิในแผ่นแบนสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ภายใต้สนามความเค้นดึงสม่ำเสมอ ดังรูปที่

2.11 พบว่าความเค้นที่มีทิศทางตั้งฉากกับเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะจะมีการกระจายความเค้นแบบไม่สม่ำเสมอและทำให้ความเค้นบริเวณขอบรูเจาะซึ่งจะมีค่าของความเค้นที่สูงมากกว่าความเค้นที่มากระทำ σ_N ซึ่งเรียกว่า ความเค้นขุมนุ้ม (Stress Concentration Factor) จากสมการที่ (2.1) เมื่อ a และ c มีความยาวเท่ากันจะลักษณะของรูเจาะเป็นแบบวงกลม ดังรูปที่ 2.12 ความเค้นดึงสูงสุดเกิดที่ขอบรูเจาะและมีขนาดมากกว่าความเค้นที่มากระทำถึง 3 เท่า และนำไปสู่การวิเคราะห์แผ่นบางแบบมีรูเจาะแบบวงรีต่อมา เมื่อ a มีค่ามาก ๆ ส่วน c จะมีค่าน้อยมาก ๆ ดังรูปที่ 2.13 จะมีลักษณะคล้ายเข็ม (Sharp Crack) เป็นเส้นตรงเสมือนรอยร้าว ซึ่งค่าของความเค้นขุมนุ้มจะมีค่าเข้าสู่เป็นอนันต์ (Stress Singularity) [23] ซึ่งเป็นตามทฤษฎี แต่ในความเป็นจริงแล้ววัสดุจะเกิดการเสียรูปทรงหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวร (Plastic Deformation) ที่บริเวณปลายรอยร้าวเสียก่อนจึงส่งผลทำให้ค่า a ลดลงและค่าของ c เพิ่มขึ้นตามลำดับ

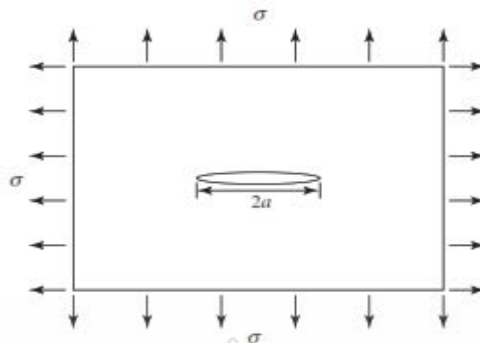
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_N} = 1 + \frac{2a}{c} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของแผ่นบางแบบเจาะรูภายใต้แรงดึง [23]



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของแผ่นบางแบบเจาะรูแบบวงกลม [23]



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของแผ่นบางแบบเจาะรูแบบวงรี [23]

ลักษณะของรูปแบบการเสียรูปทรงที่บริเวณปลายรอยร้าว

ลักษณะของรูปแบบการเสียรูปทรงที่บริเวณปลายรอยร้าวจากทิศทางการเคลื่อนตัวของระนาบรอยร้าวเทียบกับขอบหน้ารอยร้าว (Leading Edge) ซึ่งกลศาสตร์การแตกหักสามารถจำแนกรูปแบบการเสียรูปทรงออกเป็น 3 รูปแบบด้วยกัน [31] ดังรูปที่ 2.14 ได้แก่

1) รูปแบบเปิดเนื่องจากแรงดึง เรียกว่า แบบที่ 1 (Opening Mode, Mode I) โดยเมื่อแรงที่กระทำจะตั้งฉากกับผิวหน้ารอยร้าว (Crack Surface) ซึ่งทำให้ผิวหน้าของรอยร้าวเปิดออกจากกันซึ่งลักษณะรูปแบบประเภทนี้จะทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงกว่าประเภทอื่น

2) รูปแบบแรงเฉือนบนระนาบ เรียกว่า แบบที่ 2 (Sliding Mode, Mode II) โดยเมื่อแรงที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับขอบหน้าของรอยร้าว

3) รูปแบบแรงเฉือนดัด เรียกว่า แบบที่ 3 (Tearing Mode, mode III) โดยเมื่อแรงที่กระทำในทิศทางขนานกับขอบหน้าของรอยร้าวและขนานกับผิวหน้าของรอยร้าว



รูปที่ 2.14 ลักษณะของรูปแบบของการเสียรูปทรง [33]

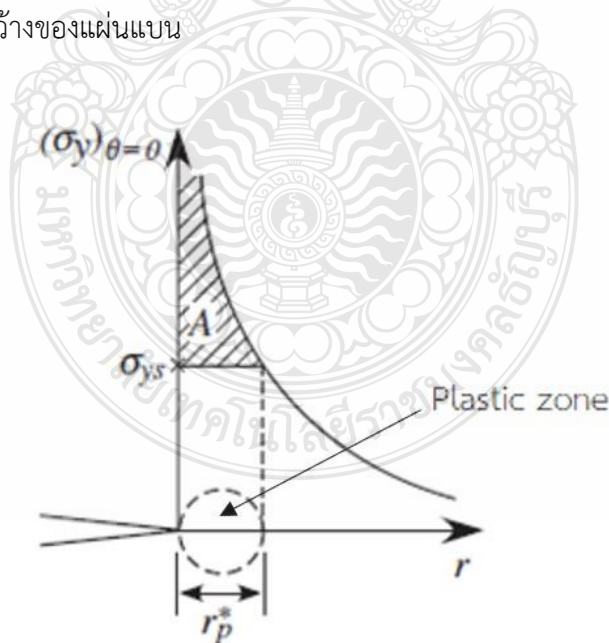
ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress Intensity Factor ,SIF)

จากการกระจายความเค้นที่บริเวณปลายรอยร้าวในแผ่นบางกว้างที่มีรูเจาะอยู่ภายใต้แรงดึง ตั้งฉากกับรอยร้าวที่มีรูปแบบการเสียรูปทรงในแบบที่ 1 หรือซึ่งบริเวณปลายรอยร้าวจะเกิดการเสียรูปทรงหรือเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (Plastic Zone) ดังรูปที่ 2.15 เมื่อ $\theta = 0$ ค่าต้านทานการแตกหักนี้จะแสดงความรุนแรงของความเค้นบริเวณรอยร้าวซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบความเข้มของความเค้น ดังสมการที่ (2.2) ซึ่งค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นนี้เป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุที่สถานะใดสถานะหนึ่งและสามารถหาได้จากการทดสอบ และเมื่อแผ่นบางสี่เหลี่ยมมีความกว้างไม่จำกัดมีรูเจาะกึ่งกลางความยาว $2a$ ดังรูปที่ 2.16 (ก) และแผ่นแบนขนาดความกว้างจำกัด (Finite Width Plate) ดังรูปที่ 2.16 (ข) เมื่อรับความเค้นดึงอย่างสม่ำเสมอ ถ้าพิจารณาเส้นทางการไหลของแรง (Force Flow Line) ที่ตำแหน่งที่ห่างจากปลายร้าวเท่ากับ W แล้วพบว่าไม่เหมือนกัน ในแผ่นบางขนาดอนันต์เส้นการไหลของแรงจะมีองค์ประกอบของแรงทั้งในแกน x และ y ส่วนแผ่นแบนขนาดจำกัดจะไม่มีองค์ประกอบในทิศทางแกน x เพราะเป็นขอบอิสระ (Free Edge) ทำให้เส้นแรงถูกบีบให้หนาแน่นของความเค้นมากกว่า ส่งผลให้ในตัวประกอบความเข้มของความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (2.3)

เมื่อ a คือ ระยะรอยร้าวเริ่มต้น

b คือ ความกว้างของแผ่นบาง

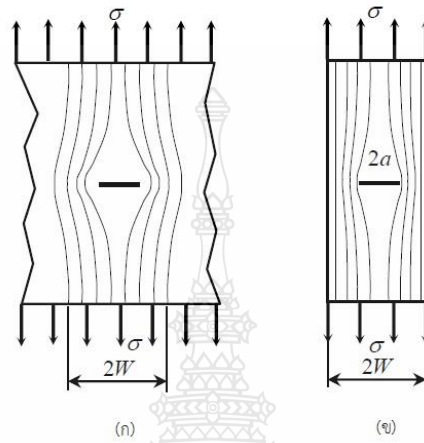
$f(a/b)$ คือ ตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตในกรณีเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความยาวรอยร้าวกับความกว้างของแผ่นแบน



รูปที่ 2.15 ขนาดของบริเวณเสียรูปพลาสติกที่ปลายรอยร้าว [34]

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r} \quad (2.2)$$

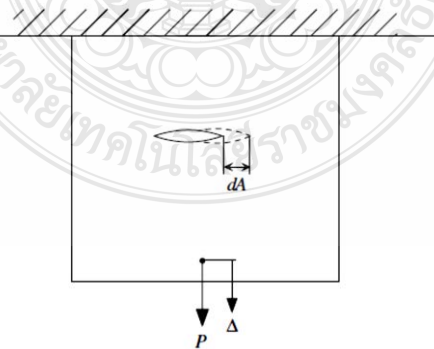
$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi} \cdot f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.16 ผลของขนาดมีผลต่อการไหลของความเค้น [31]

กฎทรงพลังงาน (The Energy Principles)

วัสดุเมื่อรับความเค้นดึงสม่ำเสมอจะทำให้รอยร้าวจะขยายตัวในขณะที่ค่าความเค้นคงที่จะทำให้จะเกิดพลังงานที่ผิวและไม่สูญหายแต่จะสะสมในรูปพลังงานความเครียด (Strain Energy) เรียกว่า พลังงานการแตกหัก (Energy Release Rate) ดังรูปที่ 2.17 และสมการที่ (2.4)



รูปที่ 2.17 แผ่นบางภายใต้ความเค้นดึงแล้วเกิดการเสียรูปทรง [34]

- โดยที่ σ คือ ความเค้น
 a คือ ความยาวของรอยร้าว
 E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

$$G = \pi\sigma^2 a/E \quad (2.4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นและพลังงานการแตกหัก

ในปี ค.ศ. 1958 Irwin พิสูจน์ว่าอัตราปลดปล่อยพลังงาน G_f ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับตัวประกอบความเข้มของความเค้น K_I ซึ่งเป็นพารามิเตอร์เฉพาะ โดยค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นหาได้จากการทดสอบ คือ แรงสูงสุดที่กระทำ (Peak Load) และระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ตามสมการที่ (2.5)

$$G_f = \frac{K_I^2}{E} \quad (2.5)$$

2.5 ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักของคอนกรีต

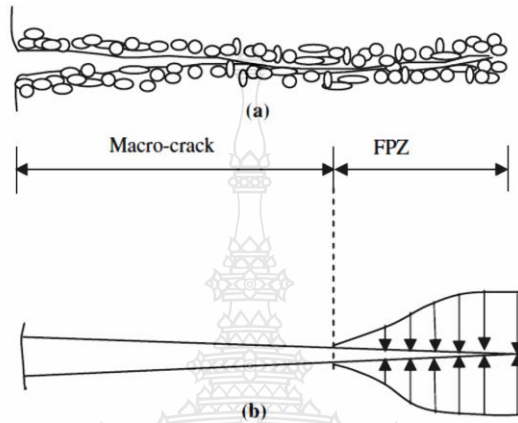
คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่เกิดจากปูนซีเมนต์และน้ำผสมกันจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเมื่อคอนกรีตแข็งตัวมักจะพบว่ามีรอยร้าวขนาดเล็ก ๆ (Microcrack) เกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากเกิดจากเนื้อคอนกรีตภายในเกิดการหดตัว (Shrinkage) การเอิ่มน้ำ (Bleeding) หรือการคืบ (Creep) เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักเป็นการศึกษาวัสดุที่มีรอยร้าวหรือที่เรียกว่าตำหนิ (Deflect) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 รอยร้าวของคอนกรีต [22]

2.5.1 Fracture Process Zone

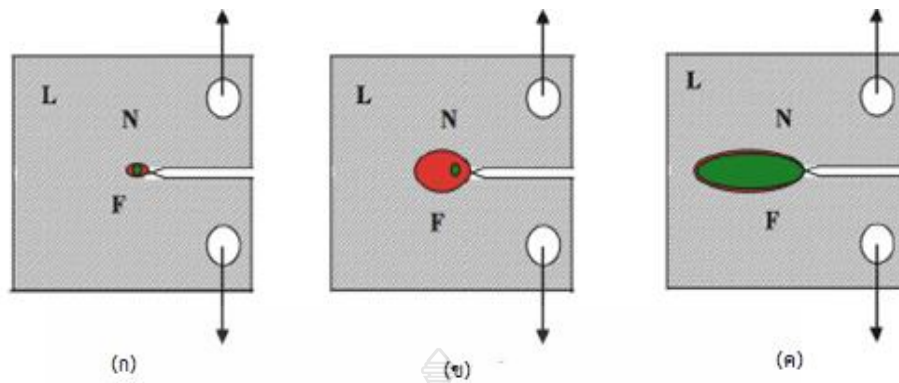
สำหรับวัสดุเมื่อถูกกระทำด้วยความเค้นดึงจะทำให้บริเวณปลายรอยร้าวจะมีการแพร่กระจายของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นแต่ความเค้นภายในจะลดลงบริเวณนี้จะเรียกว่า Fracture Process Zone ดังรูปที่ 2.19



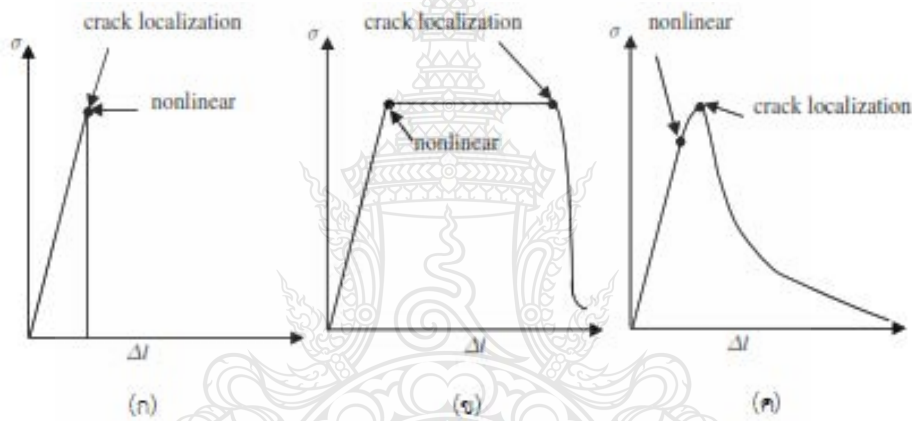
รูปที่ 2.19 Fracture Process Zone [33]

2.5.2 การจำแนกประเภทของวัสดุ

การแยกประเภทของวัสดุสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ วัสดุเปราะ (Brittle) วัสดุเหนียว (Ductile) และวัสดุกึ่งเปราะ (Quasi-brittle) จากรูปที่ 2.20 (ก) จะพบว่าพื้นที่สีเขียวที่บริเวณปลายรอยร้าวที่เรียกว่า จุดคราก (Fracture Process Zone) จะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับพื้นที่สีแดงที่บริเวณปลายรอยร้าวที่เรียกว่า Hardening Plasticity จึงจัดว่าเป็นวัสดุประเภทเปราะ จากรูปที่ 2.20 (ข) จะพบว่าพื้นที่สีเขียวที่บริเวณปลายรอยร้าวที่จะมีขนาดเล็กกว่ากับพื้นที่สีแดงที่บริเวณปลายรอยร้าว จึงจัดว่าเป็นวัสดุประเภทโลหะ และจากรูปที่ 2.20 (ค) จะพบว่าพื้นที่สีเขียวที่บริเวณปลายรอยร้าวที่จะมีขนาดใหญ่กว่ากับพื้นที่สีแดงที่บริเวณปลายรอยร้าวจึงจัดว่าเป็นวัสดุประเภทกึ่งเปราะ เช่นเดียวกับคอนกรีตจัดว่าเป็นวัสดุกึ่งเปราะในขณะที่เกิดการแตกร้าวมักจะมีการแพร่กระจาย (Crack Propagation) จากบริเวณปลายรอยร้าว จากรูปที่ 2.21 ซึ่งสามารถจำแนกประเภทวัสดุได้อีกวิธีหนึ่งซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ของความเค้นและการเสียรูปทรง โดยที่รูปภาพที่ 2.21 (ก) แสดงพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นหลังจากการทดสอบและเกิดการแตกร้าวมันที่ทันใดเมื่อแรงสูงสุด จัดว่าเป็นวัสดุเปราะ จากรูปที่ 2.21 (ข) แสดงพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นหลังจากการทดสอบและเมื่อแรงสูงสุดจะเกิดการแตกร้าวมันที่ทันใดจัดว่าเป็นวัสดุเหนียว และจากรูปที่ 2.21 (ค) จัดว่าเป็นวัสดุกึ่งเปราะ



รูปที่ 2.20 ประเภทของจุดครากของวัสดุ [33]

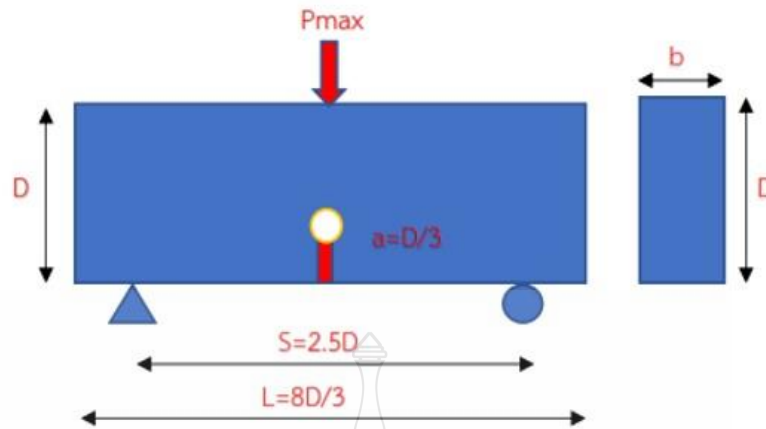


รูปที่ 2.21 ความเค้นและการเสียรูปภายใต้แรงดึงของวัสดุ [33]

2.6 Size Effect Law

Size effect สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของกลศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Fracture Mechanics) ของคอนกรีตและยังหาค่าพารามิเตอร์การแตกหักได้จากการทดสอบตัวอย่างคานด้วยแบบแรงกด 3 จุด (Three-point Bending) จนถึงการวิบัติซึ่งลักษณะการวิบัติในแบบที่ 1 ที่เรียกว่า Opening Mode ดังรูปที่ 2.22 ผลจากการทดสอบจะทำให้ได้แรงกดสูงสุดที่กระทำกับคานคอนกรีตตัวอย่าง (Ultimate Load) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาความแข็งแรงในรูปความเค้นระบุ (Nominal Strength) ได้ตามสมการที่ (2.6)

$$\sigma_N = \frac{C_N P_U}{b \cdot D} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.22 การทดสอบแรงกดแบบ 3 จุด (Three point Bending Test)

เมื่อ σ_N คือ ความเค้นระบุ, kg/cm^2

P_U คือ แรงกดสูงสุด, kg

b คือ ความกว้างของคาน, cm

D คือ ความสูงของคาน, cm

C_N คือ เป็นค่าสัมประสิทธิ์คองที่ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะรองรับฐานรองกับมิติความสูงของคาน (Span-to-Depth Ratio) มีค่าเท่ากับ $3S/2D$ เป็นค่าคงที่

2.6.1 พารามิเตอร์การแตกหัก (Fracture Parameters)

ในปี ค.ศ. 1972 Bazant Z.P. และคณะ ได้เสนอสมการพื้นฐานของ Size-effect นั้น ดังแสดงในสมการที่ (2.7) โดยใช้การทดสอบตัวอย่างคานที่มีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคาน (Notched Beams) ซึ่งมีรูปทรงเหมือนกันและมีขนาดเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน (Geometry Similarity)

$$\sigma_N = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (2.7)$$

โดยที่ B คือ ค่าคงที่ได้จากการทดสอบ

D_0 คือ ค่าคงที่ได้จากการทดสอบ

f'_t คือ กำลังรับแรงดึงประลัย

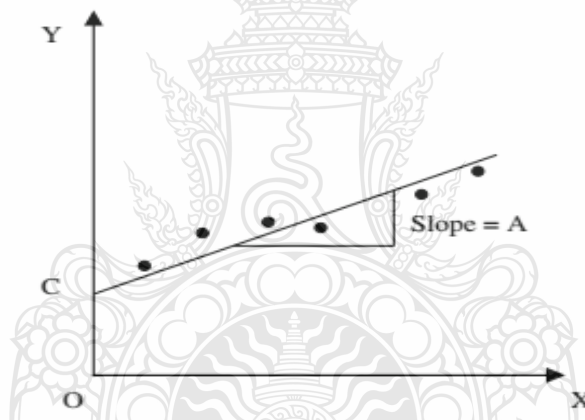
โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในสมการที่ (2.8) จะได้มาจากการทำ Curve Fitting อันเนื่องมาจากการกระจายตัวของข้อมูลที่มีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ จากรูปที่ 2.23 ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของการแตกหักต่าง ๆ ของวิธี Size-effect นั้นจะต้องอาศัยการจัดรูปของสมการ (2.7) ให้อยู่ในรูปสมการ (2.8) จะได้สมการ (2.9)

$$Y = AX + C \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{f'_t}{\sigma_N}\right)^2 = \left(\frac{1}{D_0(B'f'_t)^2}\right)D + \frac{1}{B^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ A คือ ความชัน (Slope) ของเส้นตรงที่ได้จากกราฟ

C คือ ระยะตัดแกน Y (Y-Intercept)



รูปที่ 2.23 สมการเส้นตรง [33]

จากการกำหนดขนาดตัวอย่างคานด้วย Size-effect Method และใช้อัตราส่วนของความยาวของฐานรองรับกับความสูงของคาน (Span-to-Depth Ratio) เท่ากับ 2.5 และอัตราส่วนรอยบากต่อความสูงคาน (Notched-to-Depth, α_0) เท่ากับ 0.33 [22] ค่าของตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (Geometrical Factor, $g(\alpha_0)$) มีค่าเท่ากับ 14.20 และ $g'(\alpha_0)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 72.71 ซึ่งสำหรับงานวิจัยครั้งนี้หาได้จากสมการที่ (2.12)

$$f(\alpha_0) = 6.647\sqrt{\alpha_0} \frac{1 - 2.5(\alpha_0) + 4.49(\alpha_0)^2 - 3.98(\alpha_0)^3 + 1.33(\alpha_0)^4}{(1 - \alpha_0)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.12)$$

เมื่อ $g(\alpha_0)$ คือ ตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต $= f(\alpha_0)^2$
 $g'(\alpha_0)$ คือ ค่าอนุพันธ์ลำดับหนึ่งของตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต
 E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ส่วนค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นนั้นจะคำนวณได้จากสมการที่ (2.13) ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นและค่าของพลังงานการแตกหักของ Irwin [22] ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของการแตกหักที่เหลือได้จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ

$$K_I = \frac{Bf_t'}{C_N} \sqrt{D_0 g(\alpha_0)} \quad (2.13)$$

$$C_f = \frac{g(\alpha_0)C}{g'(\alpha_0)A} \quad (2.14)$$

$$G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (2.15)$$

เมื่อ C_f คือ ความยาวประสิทธิผลของบริเวณรอบการแตกหัก (Critical Fracture Process Length)

G_f คือ พลังงานของการแตกหัก (The Fracture Energy)

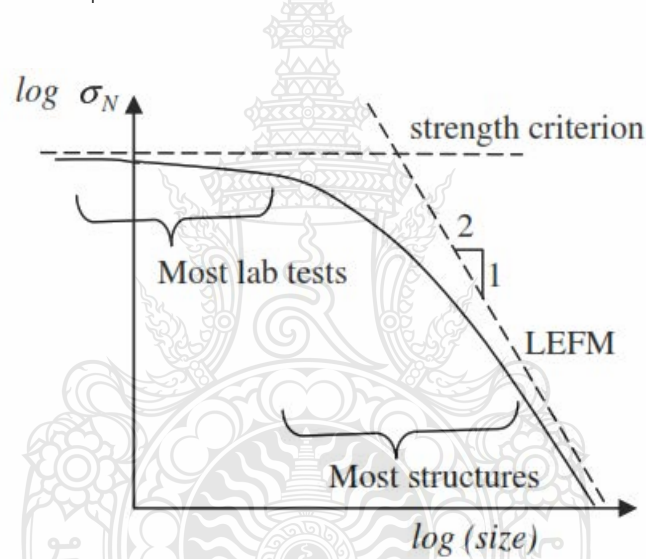
2.6.2 ตัวเลขความเปราะ (Brittleness Number)

ตัวเลขความเปราะถูกนำเสนอโดย Bažant Z.P. เช่นเดียวกับพารามิเตอร์การแตกหัก ซึ่งค่าตัวเลขความเปราะได้มาจากอัตราส่วน D/D_0 แสดงให้เห็นว่าการแตกหักของวัสดุไม่ขึ้นอยู่กับค่าของพลังงานการแตกหักของวัสดุไม่เพียงอย่างเดียวแต่จะขึ้นกับแต่ยังขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดโครงสร้างของวัสดุอีกด้วยซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.16) และสามารถใช้จำแนกพฤติกรรมของวัสดุเพื่อระบุว่าจะใช้หลักเกณฑ์ใดเหมาะสมกับวัสดุได้อีกด้วย ได้แก่ ถ้า $\beta < 0.1$ แสดงว่าต้องใช้หลักเกณฑ์ความแข็งแรง $0.1 < \beta < 10$ แสดงว่าต้องใช้ Size Effect Model และ $\beta > 10$ แสดงว่าต้องใช้หลักเกณฑ์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ตามลำดับ

$$\beta = \frac{D}{D_0} \quad (2.16)$$

2.6.3 Size Effect Curve

จากรูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นว่า Size Effect Law จะขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ 2 แบบ คือเกณฑ์ของความแข็งแรงของวัสดุ (Strength criterion) ในเส้นแนวนอนและเกณฑ์ของกลศาสตร์ยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics) ในเส้นลาดเอียงมีความชัน $-1/2$ โดยจะพบว่าเกณฑ์ความแข็งแรงของวัสดุในเส้นแนวนอนค่าของความเค้นระบุจะมีค่าคงที่ (σ_N) ซึ่งแสดงว่าไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้าง ในขณะที่วัสดุประเภทกลศาสตร์ยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้นจะมีพฤติกรรมการแตกหักแบบผสมผสานกันระหว่างเส้นตรงทั้งสองเส้นซึ่งลักษณะเป็นโค้งมีการเปลี่ยนแปลงจากเกณฑ์ของความแข็งแรงของวัสดุไปหาเกณฑ์ของกลศาสตร์ยืดหยุ่นเชิงเส้น สรุปได้ว่าโครงสร้างที่มีขนาดเล็กจะพฤติกรรมไปลักษณะของเกณฑ์ของความแข็งแรงของวัสดุ ส่วนโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่จะพฤติกรรมไปลักษณะของเกณฑ์ของกลศาสตร์ยืดหยุ่นเชิงเส้น [23]



รูปที่ 2.24 Size-Effect Curve [33]

2.7 การทดสอบตัวอย่าง

2.7.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Strength, f'_c)

กำลังรับแรงอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 39 ดังรูปที่ 2.25 เนื่องจากถ้ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีคุณภาพที่ดีก็จะส่งผลให้คุณสมบัติด้านอื่น ๆ ดีตามไปด้วย โดยทั่วไปการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กจะใช้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ในการออกแบบและสมมติฐานว่าคอนกรีตรับแรงอัดเป็นหลักแต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตในเรื่องของการรับแรงอัดเป็นพิเศษ ซึ่งการ

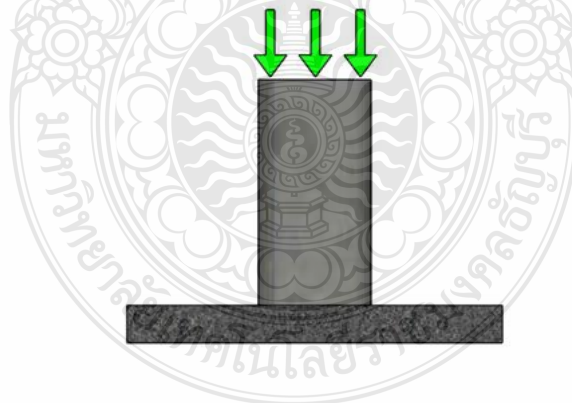
ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งที่กระทำได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบอื่น ๆ ตัวอย่างที่ใช้ ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก ซึ่ง กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกจะมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของรูปทรงลูกบาศก์ ตัวอย่างรูปทรง ลูกบาศก์ให้ค่าสูงกว่าเพราะมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างต่ำกว่าตัวอย่างรูปทรงกระบอก โดยก่อน การทดสอบตัวอย่างรูปทรงกระบอก เมื่อหล่อตัวอย่างเกิดผิวไม่เรียบด้านที่สัมผัสแทนกตของเครื่อง ทดสอบ จำเป็นต้องเจียรแต่งผิวหรือทำการเคลือบหัว (Capping) ด้วยกัมมะถันก่อนการทดสอบ ซึ่ง สามารถคำนวณหา กำลังรับแรงอัดได้ตามสมการที่ (2.17) โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบตัวอย่างของ คอนกรีต ได้แก่ ขนาดและลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ วิธีการเก็บตัวอย่าง ความชื้นในแท่งตัวอย่าง อัตราความเร็วของการหักตและวิธีการเก็บรักษา ก่อนตัวอย่าง [30]

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (2.17)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)

P คือ แรงกดสูงสุด (กิโลกรัม)

f'_c คือ กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 2.25 การทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอก

2.7.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength, f'_t)

คุณสมบัติของคอนกรีตรับกำลังรับแรงดึงได้ต่ำมากและเป็นวัสดุที่เปราะ ดังนั้นในการ ออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กจึงไม่นิยมออกแบบให้คอนกรีตรับแรงดึง แต่มีงานบางประเภท เช่น งาน

พินถนนที่กำหนดให้คอนกรีตรับแรงดึงในรูปโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยทั่วไปแรงดึงของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 7 - 11 ของกำลังรับแรงอัด ดังนั้นในการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะสมมติให้คอนกรีตรับแรงดึงไม่ได้เลยและให้เหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งหมด การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีอยู่ 2 วิธีได้แก่ วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม วิธีทดสอบดึงโดยตรง คือ การดึงตัวอย่างคอนกรีตให้ขาดออกจากกัน แต่การยึดจับตัวอย่างคอนกรีตเพื่อดึง ทำได้ยากมากจึงต้องทำการดัดแปลงอุปกรณ์ในการจับขึ้นตัวอย่างคอนกรีตให้สามารถรับแรงดึงโดยตรง นอกจากนี้ถ้าดึงคอนกรีตไม่ตรงแนวศูนย์กลางจริง ๆ จะมีแรงบิดหรือโมเมนต์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยทำให้คอนกรีตแตกหรือหักด้วยแรงอื่นไม่ใช่แรงดึงโดยตรง ดังนั้นผลการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตจากอุปกรณ์ที่ดัดแปลงขึ้นจึงมีผลไม่แน่นอนและยากต่อการทดสอบ การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีทางอ้อมเป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะทำได้ง่าย สะดวก และให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ ได้แก่ การทดสอบแรงดึงแยกโดยวิธีทดสอบแรงดัด (Flexural Strength) หรือเรียกการทดสอบว่าค่าโมดูลัสแตกร้าวและการทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Test) เป็นการทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีอ้อมที่ใช้กันมาก [30] ซึ่งสามารถคำนวณหา กำลังรับแรงดึงแยกได้ตามสมการที่ (2.18) และดังรูปที่ 2.26

$$f_t' = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.18)$$

- เมื่อ L คือ ความยาวของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)
- P คือ แรงกดสูงสุด (กิโลกรัม)
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่าง (เซนติเมตร)
- f_t' คือ กำลังรับแรงดึงแยก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 2.26 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต

2.7.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดของคานตัวอย่าง

เป็นการทดสอบแบบแรงกด 3 จุด (Three-point Bending) โดยจำลองให้ปลายด้านหนึ่งมีลักษณะฐานรากรองรับเป็นแบบ Hinge และในขณะที่ปลายอีกด้านจำลองลักษณะฐานรองรับเป็นแบบ Roller ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของ Size Effect Law เพื่อทดสอบแรงกดสูงสุด (Peak Load) ของคานตัวอย่างที่มีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคานจนถึงการวิบัติ ดังรูปที่ 2.22

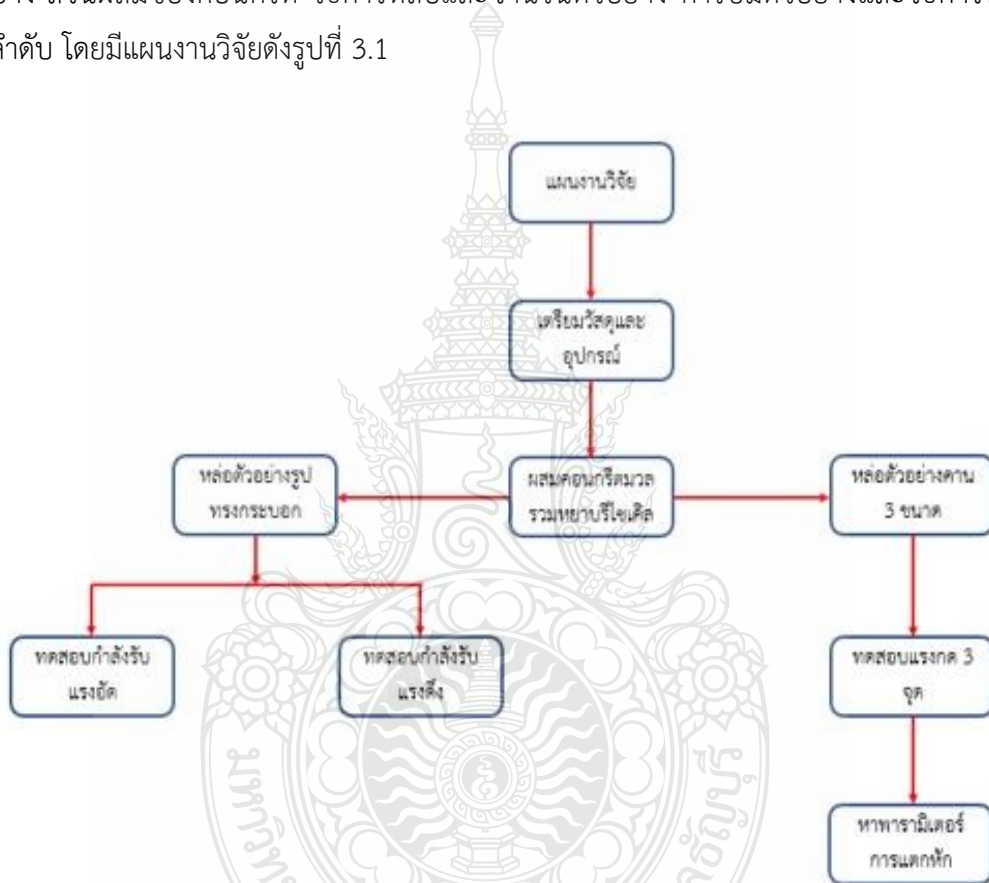


บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

(Research Methodology)

บทนี้จะกล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมตัวอย่าง ส่วนผสมของคอนกรีต วิธีการหล่อและจำนวนตัวอย่าง การบ่มตัวอย่างและวิธีการทดสอบตามลำดับ โดยมีแผนงานวิจัยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ มวลรวมหยาบปกติ และมวลรวมหยาบรีไซเคิล

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ที่ใช้ในส่วนผสมเป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15 [34] เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) เมื่อผสมกับน้ำตามสัดส่วนแล้วจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ปูนพอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

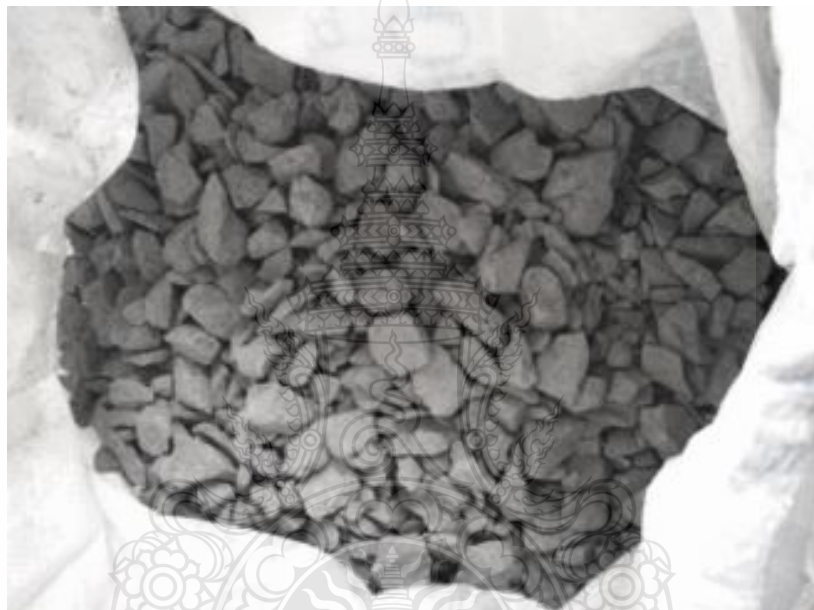
3.1.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ (River Sand) ตามมาตรฐาน ASTM C33 [35] มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.51 และ ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.65 ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 มวลรวมละเอียด

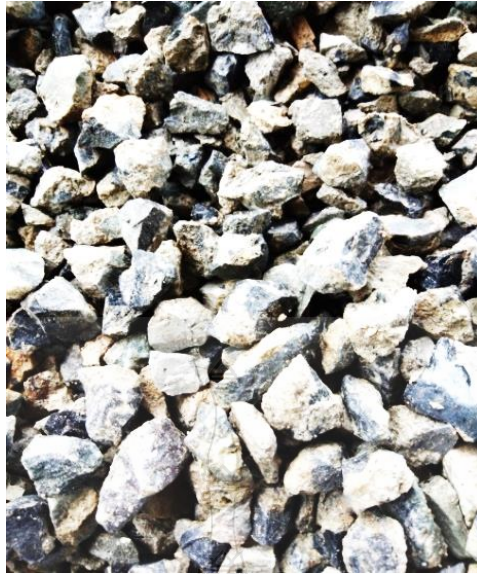
3.1.3 น้ำ ต้องเป็นน้ำที่สะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรด ต่าง น้ำมันและ อินทรีย์สารอื่น ๆ ไม่มีสิ่งเจือปน ในปริมาณที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น น้ำประปา เป็นต้น เนื่องจาก น้ำจะมีผลกระทบต่อความสามารถการเทได้ของคอนกรีตตลอดจนกำลังและความคงทนเมื่อ คอนกรีตแข็งตัว

3.1.4 มวลรวมหยาบปกติ (Limestone) มาจากหินธรรมชาติตามมาตรฐาน ASTM C294 [36] ซึ่งร่อนผ่านตะแกรงตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{4}$ " และค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งขนาดโตสุด 20 มิลลิเมตร ซึ่ง ตามคำแนะนำของ Bazant's Model ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 มวลรวมหยาบปกติ

3.1.5 มวลรวมหยาบรีไซเคิล ที่นำมาใช้ได้มาจากคอนกรีตเก่า โดยผ่านการย่อยให้มีขนาดเล็ก ลงด้วยแรงงานคนหลังจากนั้นจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{8}$ นิ้ว และค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่ง ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลสำหรับงานวิจัยนี้ ไม่เกิน 20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นไปตามพื้นฐาน Size Effect Model มวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้น โดยทั่วไปมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีน้อยกว่ามวล รวมหยาบปกติซึ่งจะมีเศษซีเมนต์เพสต์เกาะยึดอยู่โดยรอบมวลรวมหยาบและมีความเป็นเหลี่ยมคมเพิ่ม มากขึ้นดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมหยาบปกติในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวม หยาบปกติ ดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 มวลรวมหยาบรีไซเคิล

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาด 10 ตัน ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยกและแรงกดแบบ 3 จุด ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

3.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า ใช้สำหรับชั่งส่วนผสมของคอนกรีตมีความละเอียด 0.01 กรัม ดัง

รูปที่ 3.7



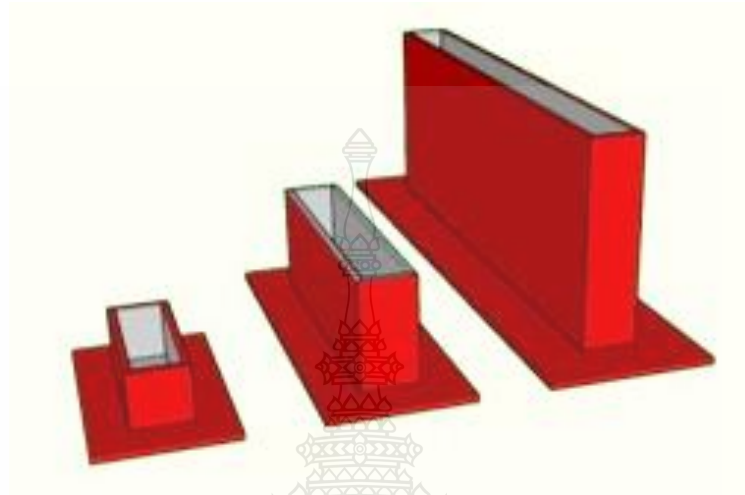
รูปที่ 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า

3.2.3 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอก

3.2.4 แบบหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตจะมีจำนวน 3 ขนาด ซึ่งแต่ละขนาดของคานตัวอย่างจะมีจำนวน 3 ชิ้นตัวอย่างต่อแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังรูปที่ 3.9 และขนาดของตัวอย่างคานคอนกรีตตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.9 แบบหล่อตัวอย่างคานตัวอย่างทั้ง 3 ขนาด

ตารางที่ 3.1 ขนาดและรูปทรงของคานตัวอย่าง (เซนติเมตร)

| ขนาดคาน | กว้าง | ยาว | สูง | ระยะ | ระยะรอย |
|----------|-------|------|------|-----------|---------|
| | | | | ฐานรองรับ | บาก |
| 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 |

3.2.5 เครื่องผสมคอนกรีตแบบโม้ รูปร่างคล้ายกันหอยซึ่งมีใบพัดเหล็กคั่นอยู่ตัวไม่ทำให้กวนส่วนผสมให้เข้ากันซึ่งสามารถประหยัดค่าแรงยังทำให้เนื้อคอนกรีตมีความสม่ำเสมอและการเอาคอนกรีตมาใช้งานไม่เกิดการแยกตัว ดังรูปที่ 3.10

3.2.6 บ่อบ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นการบ่มด้วยน้ำสะอาดเช่นเดียวกันกับน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างคอนกรีตไม่สูญเสียน้ำแก่สิ่งแวดล้อมและยังช่วยให้ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อจนพัฒนากำลังเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 เครื่องผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.11 บ่อบ่มตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

3.3 กระบวนการก่อนการทดสอบ (Pre-treatment)

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพและผลการศึกษาที่ได้จากนักวิจัยหลายกลุ่ม พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะมีเศษซีเมนต์ที่ยังหลงเหลือ (Residual Cement) อยู่จากการย่อยซากคอนกรีตเก่าที่ใช้แล้วเกาะอยู่บริเวณโดยรอบผิวมวลรวม ซึ่งจะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมหยาบแบบปกติ ดังนั้นก่อนการใช้งานจำเป็นต้องนำไปล้างน้ำให้สะอาดเพื่อกำจัดฝุ่น

และเศษเล็ก ๆ โดยนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ก่อนการนำไปใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต และหล่อตัวอย่างทดสอบต่อไป ดังในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การทำความสะอาด Recycled Aggregate

3.4 ส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีต (Mixed design)

การผสมคอนกรีตรีไซเคิลมีสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI 211.1-91 โดยออกแบบอัตราที่ใช้ ปูนซีเมนต์ : น้ำ : ทรายหยาบ : หิน โดยหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร โดยมีขั้นตอนการผสมคอนกรีตรีไซเคิล ดังนี้ ขั้นตอนแรกจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่จะใช้ให้เรียบร้อย ขั้นตอนต่อไปเริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนักวัสดุที่เตรียมไว้ตามที่ได้ออกแบบส่วนผสมไว้ก่อนหน้านั้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย มวลรวมหยาบปกติ และมวลรวมหยาบรีไซเคิล หลังจากนั้นขั้นตอนต่อไปนำปูนซีเมนต์และน้ำมาผสมกันจะได้เป็น ซีเมนต์เพสต์ แล้วจึงนำทรายหยาบมาผสมเพิ่มอีกจะได้เป็น มอร์ต้า ขั้นตอนต่อไปนำมวลรวมหยาบมาคลุกเคล้าให้กันอีกประมาณ 3-5 นาที จะได้เป็นคอนกรีตรีไซเคิลที่ต้องการ และขั้นตอนสุดท้ายนำคอนกรีตที่ได้ที่ลงแบบ ได้แก่ ตัวอย่างรูปทรงกระบอกและคานขนาดต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)

| อัตราน้ำต่อซีเมนต์ | ซีเมนต์ | น้ำ | ทรายละเอียด | มวลรวมหยาบ ปกติ | 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 |

3.5 การหล่อและการบ่มตัวอย่าง

หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้คอนกรีตแข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง ต่อกจากนั้นถอดแบบชุดทดสอบออกจากแบบเพื่อนำไปบ่มแบบเปียกรอกการทดสอบเมื่อครบอายุ 28 วัน ดังในรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างรูปทรงกระบอก



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล 3 ขนาด

3.6 การทดสอบตัวอย่าง

3.6.1 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร เพื่อหาสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C39 (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens) [37] ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอก

3.6.2 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน ตามมาตรฐาน ASTM C496 (Brazilian Tension test of Cylindrical Concrete Specimens) [38] ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทดสอบกำลังรับแรงดึงตัวอย่างรูปทรงกระบอก

3.6.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดของคานคอนกรีตตัวอย่าง (Three Point Bending Moment) ตามคำแนะนำ Bazant's Model เพื่อหาแรงกดสูงสุดแล้วนำมาคำนวณความเค้นระบุต่อไป ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การทดสอบแรงกดสูงสุดของคานตัวอย่าง



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์หรือการวิเคราะห์ (Research Result)

ในเนื้อหาบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบรวมทั้งการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ปริมาณของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่อิทธิพลต่อผลกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยกและพารามิเตอร์ของการแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ได้แก่ 0.55 , 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ มวลรวมหยาบรีไซเคิลจะนำแทนที่มวลรวมหยาบธรรมดาในอัตราส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มวลรวมหยาบรีไซเคิลจะถูกทำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนการใช้งานเพื่อลดการดูดซึมน้ำหรือเรียกว่า Pre-treatment การทดสอบจะใช้ตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10x20 เซนติเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยก ในขณะที่ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลที่มีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคาน (Notched Beams) ทั้งสามขนาด ซึ่งได้แก่ ขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ จะถูกทดสอบด้วยวิธี Three Point Bending Test ซึ่งเป็นตามข้อกำหนดของวิธี Size Effect Method สำหรับหาค่าพารามิเตอร์การแตกหักต่าง ๆ ได้แก่ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น พลังงานการแตกหักและค่าความยาวประสิทธิผลของบริเวณรอบการแตกหัก ตามลำดับ ผลจากการทดสอบมีดังต่อไปนี้

4.1 พฤติกรรมและการวิบัติของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลรูปทรงกระบอก

ตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ที่อายุที่ 28 วัน ทำการบ่มกำลังด้วยน้ำ จำนวน 3 ชั้นตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยทั้งหมดจำนวน 3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่าง ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ และปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อมวลรวมหยาบปกติร้อยละ 50 มีการปรับปรุงคุณภาพให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนการนำไปใช้ จะถูกหล่อขึ้นมาสำหรับการทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยก่อนการทดสอบแบ่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกดังกล่าวจะถูกนำไปเคลือบบริเวณพื้นผิวทั้งสองด้านให้มีความสม่ำเสมอด้วยกัมมะถัน เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของแรงอัดตลอดพื้นที่ผิวของตัวอย่างในขณะทำการทดสอบ ดังในรูปที่ 4.1 เมื่อนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบแล้วเพิ่มน้ำหนักจากเครื่องทดสอบอย่างต่อเนื่องในอัตราความเร็วคงที่จนตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติในที่สุดภายใต้แรงอัดนั้น ตัวอย่างรูปทรงกระบอกได้รับแรงกดจะมีการหดตัวตามแนวยาวและขยายตัวออกทางด้านข้างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างจากการทดสอบจะเอียงเป็นแบบ 45

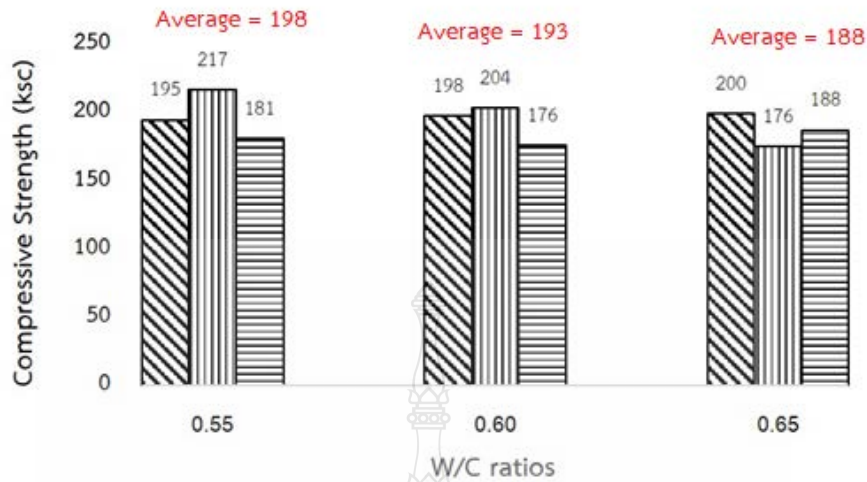
องศา เป็นรูป Cone Shape เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตไม่สามารถขยายตัวทางด้านบนและด้านล่างได้ เพราะเกิดการยึดรั้งด้วยเครื่องมือทดสอบทำให้จึงมีแนววิบัติไปตามทิศทางของแรงกดทำให้การแตกร้าว เกิดขึ้นจากจุดกึ่งกลางภายในแล้วขยายตัวออกสู่ตามผิวด้านภายนอกซึ่งสอดคล้องกับกฎของ อัตราส่วนปัวซอง ดังในรูปที่ 4.2 กำลังแรงอัดของตัวอย่างทั้ง 3 อัตราส่วนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 198 , 193 และ 188 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 พบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ในเนื้อคอนกรีตลดลงจึงทำให้การยึดเหนี่ยว และเชื่อมประสานช่องว่างและอุดรูพรุนระหว่างมวลรวมมีจำนวนไม่เพียงพอและในขณะที่ปริมาณน้ำ กลับเพิ่มขึ้นนั้นจึงทำให้มีปริมาณน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจึงส่งผลให้กำลังอัดรับแรงอัดลดลง เช่นเดียวกัน โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 3.03 และ 5.05 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่เคลือบผิวแล้ว



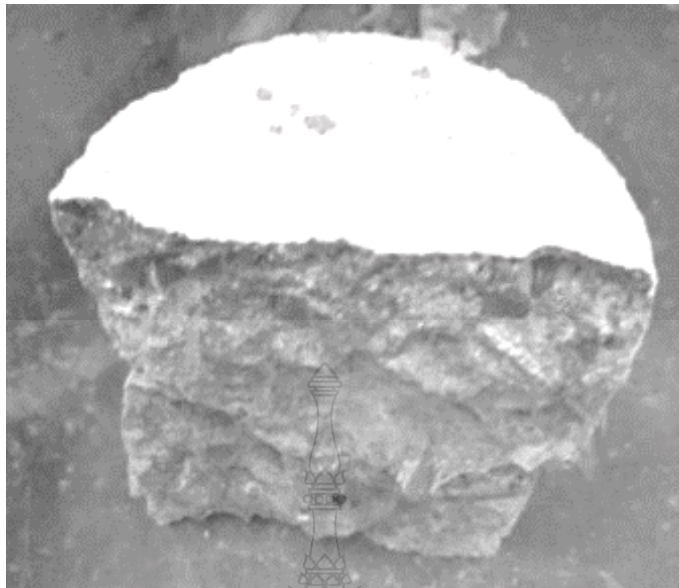
รูปที่ 4.2 การวิบัติหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด



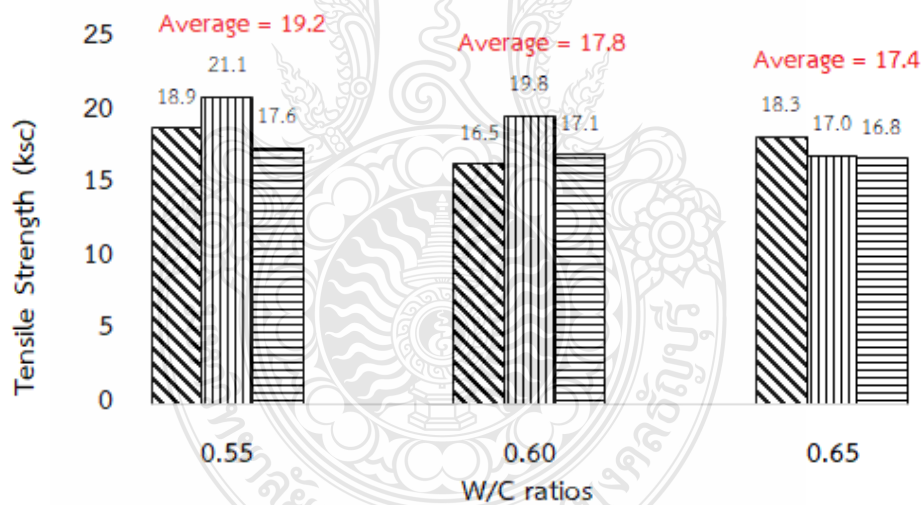
รูปที่ 4.3 ผลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

4.2 พฤติกรรมและรูปแบบของการวิบัติของการทดสอบการกำลังรับแรงดึงแยกของตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลรูปทรงกระบอก

งานวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยก (Splitting Tensile Strength) โดยวิธีทางอ้อมตามมาตรฐาน C496 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่างเหมือนในกรณีของการทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลจากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 0.60 และ 0.65 และปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อมวลรวมหยาบปกติร้อยละ 50 และมีการปรับปรุงคุณภาพให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนการนำไปใช้ จากการสังเกตเมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กระทำอย่างต่อเนื่องในอัตราความเร็วคงที่จนคอนกรีตถึงจุดแตกและเกิดการวิบัติในที่สุดภายใต้แรงกดนั้น พบว่าตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลรูปทรงกระบอกจะมีการแตกร้าวจากจุดที่รับแรงกดส่งผ่านตลอดก่อนตัวอย่างคอนกรีตเป็นเส้นตรงจนถึงจุดฐานรองรับ ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่ากำลังรับแรงดึงแยกเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลรูปทรงกระบอกคอนกรีต เท่ากับ 19.2, 17.8 และ 17.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงดึงแยกเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดเนื่องจากเป็นคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยมีความลดลงเฉลี่ยร้อยละ 6.81 และ 9.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 การวิบัติของตัวอย่างที่ถูกทดสอบกำลังรับแรงดึงแยก



รูปที่ 4.5 ผลของกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

4.3 พฤติกรรมและรูปแบบของการวิบัติของตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากการทดสอบแรงกดแบบ 3 จุด

การหาพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลในงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานของ Size Effect Method ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลที่มีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคาน (Notched Beams) ซึ่งมีรูปทรงเหมือนกันและมีขนาดเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน (Geometrical

Similarity) จำนวน 3 ขนาด เล็ก กลาง และใหญ่ โดยในแต่ละขนาดจะใช้ตัวอย่างคานจำนวน 3 ชิ้น ตัวอย่าง สำหรับแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่มีความแม่นยำสูง คานคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ทั้งหมดมีจำนวน 27 ตัวอย่าง ที่อายุที่ 28 วัน โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete, RCA) แทนที่ด้วยมวลรวมหยาบปกติในปริมาณผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ได้แก่ 0.55 , 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ ตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบด้วยวิธีแบบแรงกด 3 จุด (Three point Bending) โดยจำลองให้ปลายด้านหนึ่งมีลักษณะฐานรองรับเป็นแบบ Hinge และในขณะที่ปลายอีกด้านจำลองลักษณะฐานรองรับเป็นแบบ Roller เพื่อหาค่าของแรงกดสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ลักษณะของการวิบัติรูปแบบดังกล่าวนี้โดยพื้นฐานของกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic fracture Mechanics) แล้ว พบว่าเป็นการเสียรูปทรงในรูปแบบที่ 1 ที่เรียกว่า Opening Mode นั้นเอง



รูปที่ 4.6 คานตัวอย่างก่อนการทดสอบด้วย Three-point Bending Test



รูปที่ 4.7 คานตัวอย่างภายหลังจากการวิบัติ

4.3.1 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาดเล็ก

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กระทำอย่างต่อเนื่องในอัตราความเร็วคงที่จนคอนกรีตถึงจุดครากและเกิดการวิบัติในที่สุดภายใต้แรงกดนั้น จากการสังเกตพบว่าการแตกร้าวของคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะเริ่มต้นจากปลายรอยบากของคานจะเกิดความเสียหายก่อนและกระจายเป็นเส้นตรงตลอดแนวถึงจุดของแรงกดจากเครื่องทดสอบ โดยแรงที่กระทำจะตั้งฉากกับผิวหน้าของรอยร้าวลักษณะการวิบัติจะเกิดแบบ Surface Failure ตรงบริเวณที่เป็นซีเมนต์เพสต์เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ส่วนเป็นมวลรวมหยาบจะเกิดความเสียหายน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวซีเมนต์เพสต์จะมีจำนวนมากกว่ามวลรวมหยาบทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลลดลง

4.3.2 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาดกลาง

ข้อมูลจากรูปที่ 4.9 พบว่าตัวอย่างคานขนาดกลางจะมีรูปแบบลักษณะการวิบัติเป็นแบบ Surface Failure และ Aggregate Failure เกิดขึ้นไปพร้อม ๆ กัน เมื่อมีแรงมากกระทำลักษณะของการวิบัติจะเริ่มจากปลายรอยบากได้รับความเสียหายที่เกิดขึ้นก่อนซึ่งจะเกิดในส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์พร้อมกับเกิดความเสียหายในส่วนที่เป็นมวลรวมหยาบ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะมีการกระจายของสัดส่วนผสมของคอนกรีตค่อนข้างดีกว่าตัวอย่างคานขนาดเล็กและอันเนื่องมาจากขนาดความสูงของตัวอย่างคานที่มีสัดส่วนเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับขนาดเล็กทำให้มีการกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ดีกว่าส่งผลให้สามารถรับแรงกดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นกว่าตัวอย่างคานขนาดเล็ก

4.3.3 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาดใหญ่

ข้อมูลจากรูปที่ 4.10 พบว่าตัวอย่างคานขนาดใหญ่จะมีรูปแบบลักษณะการวิบัติเป็นแบบ Surface Failure และ Aggregate Failure มีความชัดเจนกว่าตัวอย่างคานทั้งสองขนาดเพราะว่าด้วยเรื่ององขนาดความสูงของตัวอย่างคานมีสัดส่วนเป็นสองเท่าตัวอย่างคานขนาดกลางและเป็นสี่ของตัวอย่างคานขนาดเล็ก ทำให้มีการกระจายที่ดีกว่าส่งผลให้ความแรงของตัวอย่างเพิ่มขึ้นกว่าตัวอย่างคานทุกขนาด



รูปที่ 4.8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลขนาดเล็ก



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตขนาดกลาง



รูปที่ 4.10 รูปแบบการวิบัติตัวอย่างคานคอนกรีตขนาดใหญ่

4.4 ผลการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกลศาสตร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

ผลของการทดสอบแบบแรงกด 3 จุด ของตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้ง 3 ขนาด แสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่าแรงกดสูงสุดเฉลี่ยในอัตราน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 ของตัวอย่างคานขนาดเล็ก กลางและใหญ่ มีค่าเท่ากับ 298.67, 458.67 และ 853.33 กิโลกรัม ตามลำดับ แรงกดสูงสุดเฉลี่ยในอัตราน้ำต่อซีเมนต์ 0.60 ของตัวอย่างคานขนาดเล็ก กลางและใหญ่ มีค่าเท่ากับ 259.67, 523.33 และ 876.00 กิโลกรัม ตามลำดับ และแรงกดสูงสุดเฉลี่ยในอัตราน้ำต่อซีเมนต์ 0.65 ของตัวอย่างคานขนาดเล็ก กลางและใหญ่ มีค่าเท่ากับ 234.33, 406.67 และ 666.00 กิโลกรัม ตามลำดับ

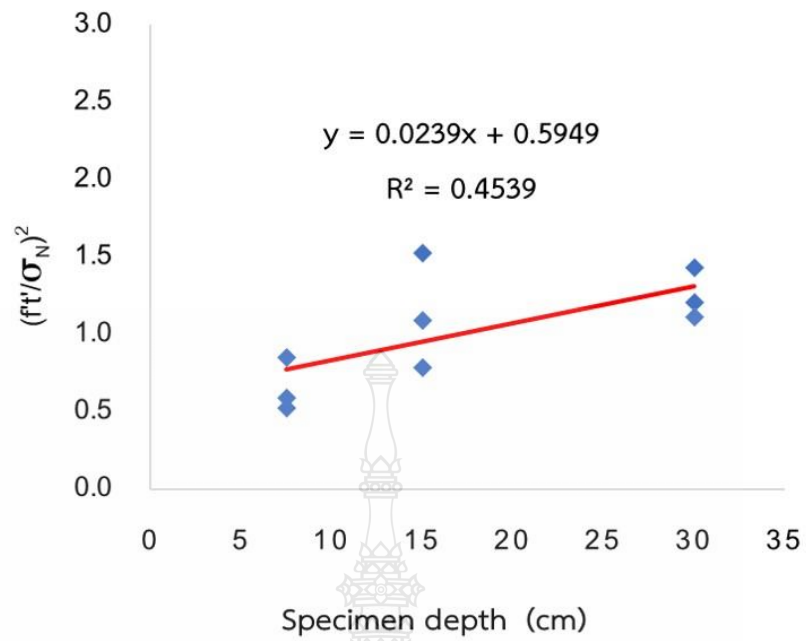
จากรูปที่ 4.11 , 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ เป็นการแสดงค่าของสมการ Linear Regression ของอัตราน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 , 0.55 และ 0.60 ตามลำดับ และตารางที่ 4.2 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณในแต่ละอัตราน้ำต่อซีเมนต์ ได้แก่ค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (K_f) ที่มีค่าเท่ากับ 128.70, 107.38 และ 87.42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าพลังงานของการแตกหัก (G_f) มีค่าเท่ากับ 0.08, 0.05 และ 0.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรคูณรากที่สองของเซนติเมตรและมีความยาวประสิทธิผลของบริเวณรอบการแตกหัก (C_f) เท่ากับ 4.86, 2.64 และ 1.67 เซนติเมตร จะพบว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นลดลงเฉลี่ยร้อยละ 16.56 และ 32.07 ตามลำดับ พลังงานของการแตกหักมีค่าลดลงเฉลี่ย 37.5 และ 50.00 ตามลำดับ และความยาวประสิทธิผลของบริเวณรอบการแตกหักมีค่าลดลงเฉลี่ย 45.68 และ 65.64 ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่าง ๆ ที่ลดลงอย่างชัดเจนนั้นจะสอดคล้องกันกับกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยกนั่นเอง

ตารางที่ 4.1 แรงกดสูงสุดของคานตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ (กิโลกรัม)

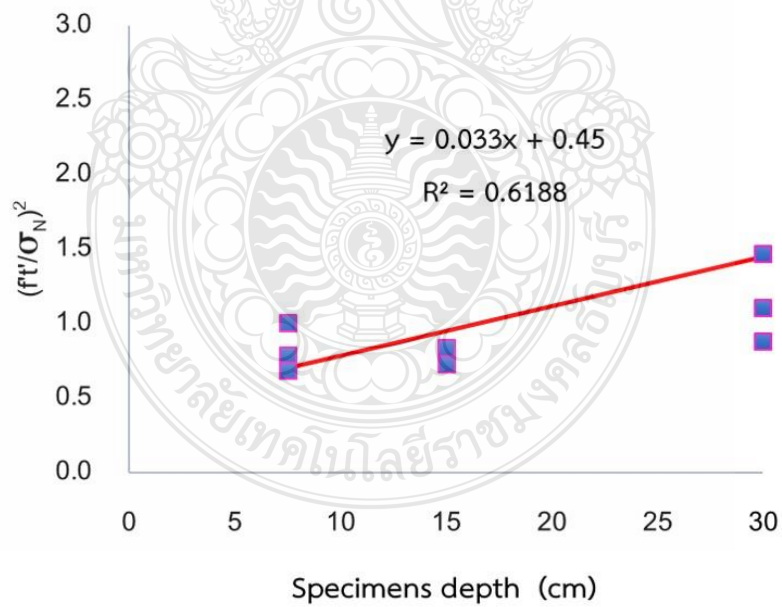
| ขนาดของคาน | อัตราน้ำต่อซีเมนต์ | | |
|------------|--------------------|------|------|
| | 0.55 | 0.60 | 0.65 |
| ขนาดเล็ก-1 | 329 | 263 | 278 |
| ขนาดเล็ก-2 | 258 | 233 | 187 |
| ขนาดเล็ก-3 | 309 | 283 | 238 |
| ขนาดกลาง-1 | 536 | 523 | 410 |
| ขนาดกลาง-2 | 455 | 541 | 395 |
| ขนาดกลาง-3 | 385 |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

ตารางที่ 4.2 ผลของพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

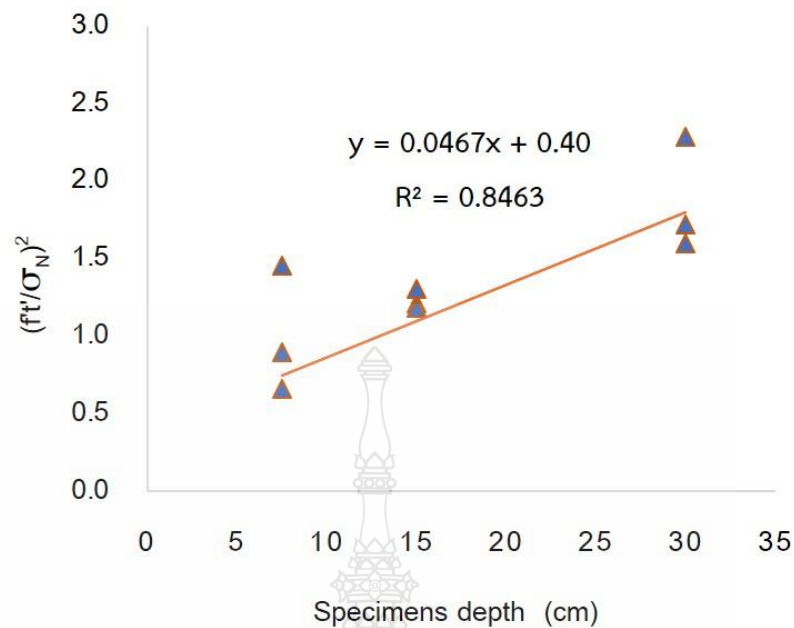
| W/C ratios | K_I (ksc) | G_f (ksc \sqrt{cm}) | C_f (cm) |
|------------|-------------|--------------------------|------------|
| 0.55 | 128.70 | 0.08 | 4.86 |
| 0.60 | 107.38 | 0.05 | 2.64 |
| 0.65 | 87.42 | 0.04 | 1.67 |



รูปที่ 4.11 Linear Regression W/C Ratios 0.55



รูปที่ 4.12 Linear Regression W/C Ratios 0.60



รูปที่ 4.13 Linear Regression W/C Ratios 0.65

4.5 ตัวเลขความเปราะ (Brittleness Number)

จากตารางที่ 4.3 ค่าตัวเลขของความเปราะของตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล ในอัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.55 มีค่าเท่ากับ 0.301 , 0.603 และ 1.205 ตามลำดับ อัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.60 ค่าเท่ากับ 0.555 , 1.110 และ 2.220 ตามลำดับ และส่วนอัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.65 ค่าเท่ากับ 0.876 , 1.751 และ 3.503 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าตัวเลขความเปราะที่คำนวณได้นั้นจะแปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับพลังงานการแตกหักที่ปล่อยออกมาที่มีค่าลดลงตามลำดับ สำหรับในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกันนั้นพบว่าค่าตัวเลขของความเปราะที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของคานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากคานที่มีขนาดใหญ่มีโอกาสที่จะมีจุดอ่อนแอมากกว่าคานขนาดเล็กซึ่งอาจเกิดขึ้นจาก โพรงอากาศ รอยร้าวภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่เกิดจากการหดตัวหรืออาจเกิดจากจุดอ่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์นั่นเอง

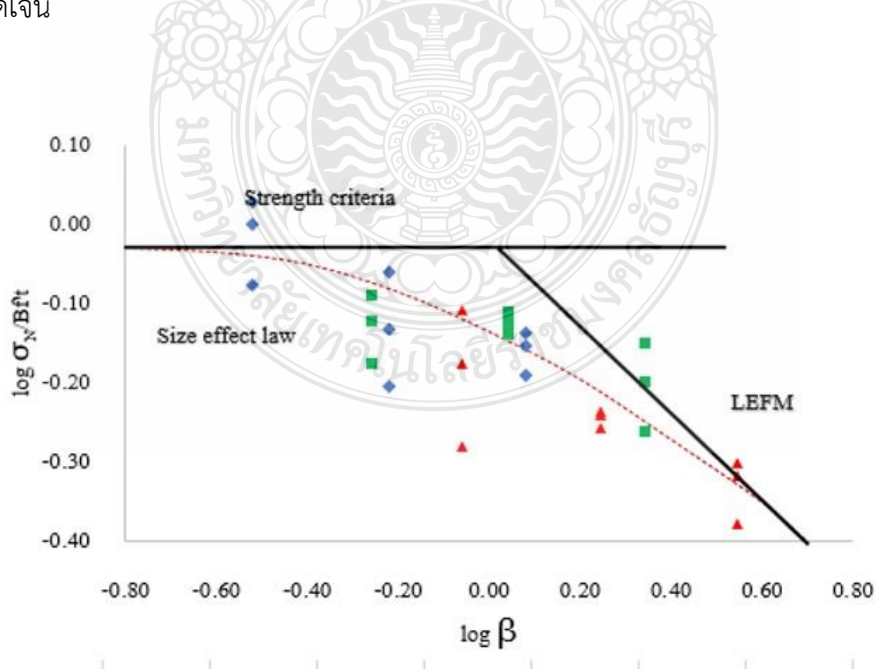
เมื่อพิจารณาจากภาพรวมของตัวเลขของความเปราะพบว่า คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีค่าตัวเลขของความเปราะอยู่ในช่วง $0.1 < \beta < 10$ ตาม Size-effect Law นั้น สามารถจัดได้ว่าเป็นวัสดุประเภทกึ่งเปราะ (Quasi-brittle) และอาจต้องใช้การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ของการแตกหักแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Fracture Mechanics) เพื่อศึกษาและอธิบายพฤติกรรมอื่น ๆ ของมันต่อไป

ตารางที่ 4.3 ผลของตัวเลขความเปราะ

| ขนาดของคานตัวอย่าง | ค่าตัวเลขความเปราะ | | |
|--------------------|--------------------|-------|-------|
| | อัตราน้ำต่อซีเมนต์ | | |
| | 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 |

4.6 Size Effect Curve

จากรูปที่ 4.14 ซึ่งได้จากการพล็อตกราฟใน Log-Log Scale ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของความสูง ในแกน x กับ ความเค้นระบุในแกน y ของคานตัวอย่าง จากรูปแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างคานคอนกรีตรีไซเคิลซึ่งมีขนาดเล็กจะมีพฤติกรรมที่ลู่เข้าหาเกณฑ์ความแข็งแรงในแนวนอน ในขณะที่คานคอนกรีตรีไซเคิลที่มีขนาดใหญ่จะมีพฤติกรรมเอียงไปหาเกณฑ์ของกลศาสตร์การแตกหัก ยืดหยุ่นเชิงเส้น ในขณะที่คานตัวอย่างขนาดกลางจะอยู่บริเวณส่วนที่เป็น Transition Zone ระหว่างเกณฑ์ความแข็งแรงของวัสดุทั้ง 2 โชน ค่าที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ เป็นสิ่งยืนยันว่า Size-effect Method นี้ เป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการแสดงบริเวณที่เป็น Transitional Size-effect Zone ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.14 Size Effect Curve

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendations)

ในเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์และแนวทางต่อการวิจัยอย่างต่อเนื่องในการนำมวลรวมหยาบรีไซเคิลมาใช้ในงานคอนกรีตเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาด้านวิศวกรรมวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืนต่อไป สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55, 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ โดยใช้การแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ศึกษาในครั้งนี้ได้มาจากการย่อยจากซากคอนกรีตเก่า มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ได้จากการแยกย่อยนี้ถูกนำไปผ่านขั้นตอน Pre-treatment ให้สภาพอิมตัวแห้งก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสม หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจะถูกทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และพารามิเตอร์การแตกหักด้วย Size Effect Method ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 3.03 และ 5.05 ตามลำดับ และกำลังรับแรงดึงมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 6.81 และ 9.10 ตามลำดับ

5.1.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์การแตกหักได้แก่ ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 16.56 และ 32.07 ตามลำดับ อัตราการปลดปล่อยพลังงานการแตกหักมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 37.50 และ 50.00 ตามลำดับ และความยาวประสิทธิผลรอบบริเวณรอยร้าวค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 45.68 และ 65.64 ตามลำดับ ส่วนตัวเลขความแปรปรวนกลับพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.3 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 0.55 จะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และค่าพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อื่นๆ

5.1.4 จากทฤษฎีการกลศาสตร์การแตกหักของคอนกรีตทำให้ทราบว่าคอนกรีตเป็นวัสดุประเภทกึ่งเปราะ (Quasi-brittle) และพฤติกรรมของคอนกรีตต้องใช้หลักเกณฑ์ของความแข็งแรง (Strength Criterion) เนื่องจากโครงสร้างขนาดเล็กและหลักเกณฑ์ของกลศาสตร์การแตกหักยึดหยุ่น

แบบเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics) สำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่ ขณะที่ตัวเลขความเปราะยังแสดงให้เห็นว่าจะขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาของงานวิจัยครั้งนี้เป็นพื้นฐานนำไปสู่การวิจัยต่อไปดังนี้

5.2.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้มีค่าต่างกันไม่มากนักจึงทำให้ผลการทดสอบแสดงค่าจากการทดสอบมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน

5.2.2 กำลังของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถพัฒนากำลังให้สูงขึ้นได้โดยใช้อัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำลง แต่จำเป็นต้องมีปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิลก่อนนำไปเป็นส่วนผสมและหล่อตัวอย่างซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การเคลือบผิวมวลรวมหยาบรีไซเคิลด้วยซิลิกาฟุ่ม เพื่อลดความต้องการน้ำหรือใส่สารลดน้ำ เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] Li J-B, Xiao J-Z, Huang J, "Influence of recycled coarse aggregate replacement percentages on compressive strength of concrete," *Journal of Building Materials*, vol. 9, pp. 297-301, 2006.
- [2] Nagataki S, Iida K, "A critical review on the use of recycled aggregate for concrete," in *5th International Symposium on the Cement and Concrete*, Shanghai, 2002.
- [3] Hansen TC, and Narud H, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregates," *Concrete International*, vol. 8, pp. 79-83, 2016.
- [4] Xiao, Jianhuang, Li, Wengui, Fan, Yuhui, and Huang, Xiao, "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)," *Construction and Building Materials Journal*, vol. 31, pp. 364-383, 2012.
- [5] Musiket K, Rosendahl M, Xi Y.(2016). "Fracture of recycled aggregate concrete under high loading rates," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, 2016.
- [6] อภิรักษ์ มาตรนอก, "การศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหายาบธรรมชาติดต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา ,2555.
- [7] นิธิศ สุภารี, "การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตและความสามารถในการซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหายาบจากเศษคอนกรีตฝายกัน," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา ,2557.
- [8] เทิดศักดิ์ สายสุทธิ์, "RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต," ใน *รายงานการประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาลัยกำแพงแสน นครปฐม, 2555, น. 1725-1735.
- [9] Nelson, S.C.N. "High-strength structural concrete with recycled aggregates," Master's thesis, University of Southern Queensland, Queensland, 2004.
- [10] Kou, Shicong, "Reusing Recycled Aggregates in Structural Concrete," Master's thesis, The Hong Kong Polytechnic University.2006.
- [11] Rasheeduzzafar, Khan, & A, "Recycled Concrete a Source of New Aggregate," *Cement Concrete and Aggregates (ASTM)*, vol. 6, pp.17-27, 1984.
- [12] Kotrayothar, Duangthidar, "Recycled aggregate concrete for structural applications," Master's thesis, University of Western Sydney, Sydney, 2012.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Rahal K, “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate,” *Building and Environment*, vol. 42, pp. 407-415, 2007.
- [14] Ravindrarajah, C, and T. Tam, “Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 37, pp. 29-38, 1985.
- [15] Ravindra Gettu, Zdenek P, Bazant, Martha E, and Karr, “Fracture properties and brittleness of High-Strength Concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 87, pp. 608-618, 1990.
- [16] Xiao, Jiabin Li, Zhang ch, “On statistical characteristics of compressive strength of recycled aggregate concrete,” *Structural Concrete*, vol. 6, pp. 149-153, 2005.
- [17] Etxeberria M, Vazquez E, Mari A, and Barra M, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,” *Cement Concrete Research*, vol. 37, pp. 735-742, 2007.
- [18] Domingo-Cabo, A, Lázaro, C, López-Gayarre, F, Serrano-López, M.A, Serrana-López, and Serna P, “Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete,” *Construction Building Materials*, vol. 23, pp. 2545-2553, 2009.
- [19] Fraaij, A. L., Pietersen, H. S., and Vries, J, “Performance of Concrete with Recycled Aggregates,” in *the International Conference: Sustainable Concrete*, Scotland, 2002.
- [20] ชูติพงศ์ เอื้อฐิติตาภรณ์, “การศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบาเป็นวัสดุผสมรวม,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา ,2555.*
- [21] อลงกต บุญศิริ, “การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงระดับที่ใช่มวลรวมหยาบของคอนกรีตถนนเก่าที่นำกลับมาใช้ใหม่,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา ,2557.*
- [22] Ravindrarajah R.S, Steward M, and Greco D, “Variability of recycled concrete aggregate and its effects on concrete properties,” in *2nd Engineering Materials*, California, 2001.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] Zongjin Li, *Advanced Concrete Technology*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [24] สนั่น เจริญเฝ้าและวินิต ช่อวิเชียร, *คอนกรีตเสริมเหล็ก*. ครั้งที่พิมพ์ 8. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- [25] สำเร็จ รักซ้อน, *การออกแบบโครงสร้างเสริมเหล็ก*, ครั้งที่พิมพ์ 2. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [26] วิทวัส สิทธิกุล, *เทคนิคก่อสร้าง*, ครั้งที่พิมพ์ 1. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [27] วินิต ช่อวิเชียร และวรนิติ ช่อวิเชียร, *การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก*, ครั้งที่พิมพ์ 4. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [28] สมศักดิ์ คำปลิว, *การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก*, ครั้งที่พิมพ์ 1. กรุงเทพฯ: เอช.เอ็น.กรุ๊ป จำกัด, 2541.
- [29] นิพนธ์ อังกรานันท์, *คู่มือออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก*, ครั้งที่พิมพ์ 4. กรุงเทพฯ:บริษัท โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮ้าส์ จำกัด, 2544.
- [30] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุพิทักษ์กุล, *ปูนซีเมนต์ ปอบโซลาน และ คอนกรีตเหล็ก*, ครั้งที่พิมพ์ 7. กรุงเทพฯ:สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2555.
- [31] จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, *กลศาสตร์การแตกหัก (ออนไลน์)*, 2562, สืบค้นจาก www.pioneer.netserv.chula.ac.th. (1 พฤศจิกายน 2562).
- [32] จำลอง ลิ้มตระกูล, *การออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก(ออนไลน์)*, 2562, สืบค้นจาก www.ph01.tci-thaijo.org. (1 พฤศจิกายน 2562).
- [33] S. Kumar, S.V. Barai, *Concrete Fracture Models Applications*, New York: Springer Science & Business Media, 2011.
- [34] Zihai Shi, *Crack Analysis in Structural Concrete Theory and Applications*, Burlington: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [35] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. *มอก. 15 เล่ม 1-2547. ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547.
- [36] American Society for Testing and Materials. *ASTM C33/C33M-18 Standard specification for concrete aggregates*. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

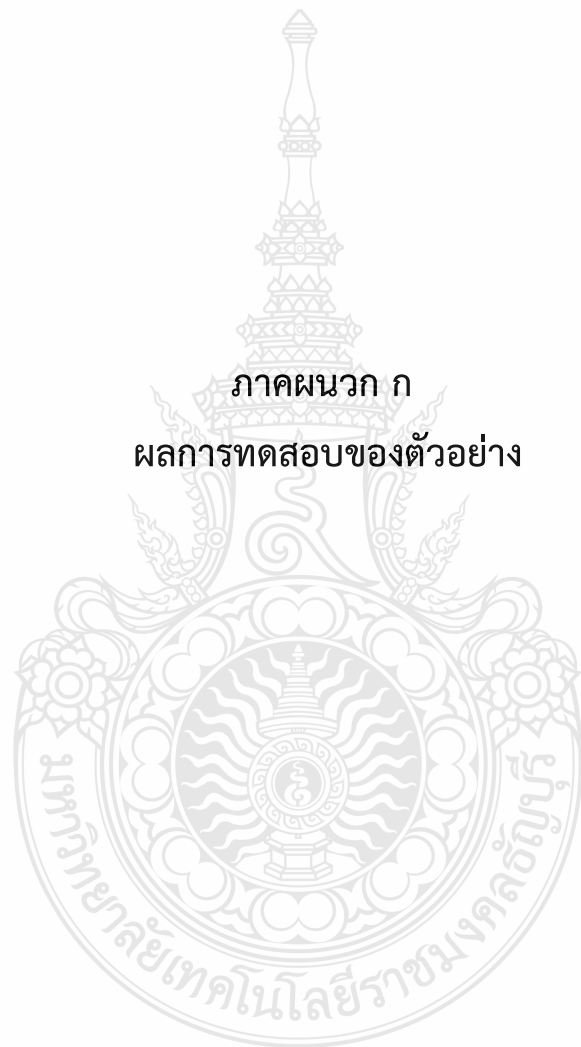
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [37] American Society for Testing and Materials, *ASTM C294-19 Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates*, West Conshohocken: ASTM International, 2019.
- [38] American Society for Testing and Materials, *ASTM C 39/C 39M-99: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, USA: Annual Book of ASTM Standard, 1999.
- [39] American Society for Testing and Materials, *ASTM C 496 - 96: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, USA: Annual Book of ASTM Standard, 1996.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบของตัวอย่าง

ตารางที่ ก1 กำลังรับแรงอัดประลัย (Ultimate compressive strength, ksc)

| อัตราการแทนที่ % | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | ค่าเฉลี่ย |
|------------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 50 | 198 | 204 | 176 | 193 |
| 75 | 120 | 196 | 192 | 169 |
| 100 | 99 | 81 | 102 | 94 |

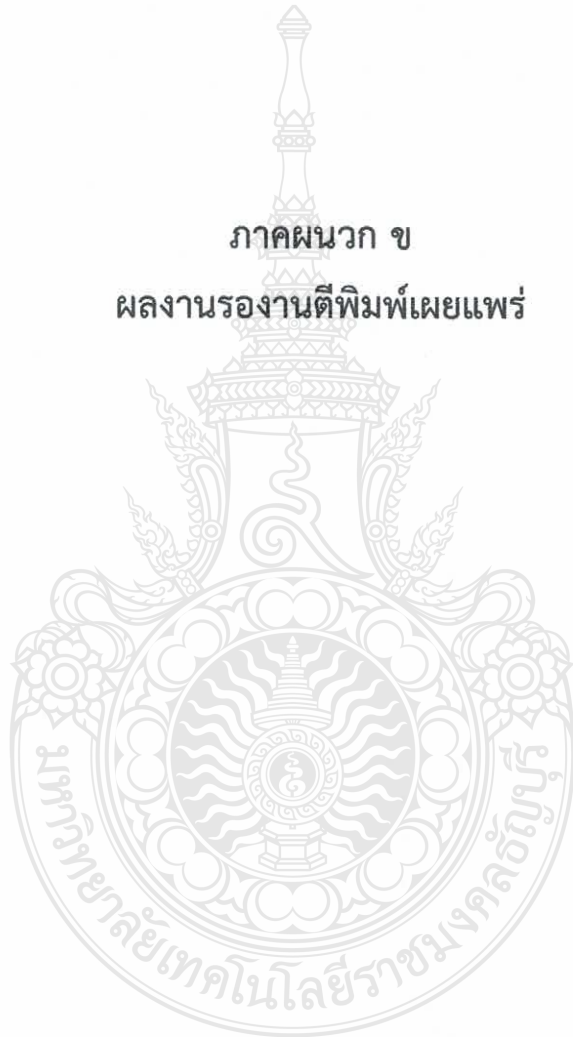
ตารางที่ ก2 กำลังรับแรงดึงแยกประลัย (Ultimate tensile strength, ksc)

| อัตราการแทนที่ % | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | ค่าเฉลี่ย |
|------------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 50 | 18.76 | 22.91 | 18.20 | 19.95 |
| 75 | 17.91 | 17.82 | 17.63 | 17.79 |
| 100 | 10.92 | 15.90 | 19.94 | 15.59 |

ตารางที่ ก3 ผลของความเค้นระบุของคานมีรอยบากกึ่งกลาง (Nominal strength, ksc)

| ขนาดของคาน | อัตราการแทนที่ร้อยละ | | |
|------------|----------------------|-------|-------|
| | 50 | 75 | 100 |
| ขนาดเล็ก-1 | 23.58 | 21.08 | 11.17 |
| ขนาดเล็ก-2 | 21.92 | 23.17 | 9.75 |
| ขนาดเล็ก-3 | 19.33 | 18.08 | 8.58 |
| ขนาดกลาง-1 | 22.33 | 16.00 | 6.92 |
| ขนาดกลาง-2 | 22.54 | 16.83 | 8.63 |
| ขนาดกลาง-3 | 21.08 | 17.67 | 9.67 |
| ขนาดใหญ่-1 | 15.92 | 19.17 | 10.21 |
| ขนาดใหญ่-2 | 18.33 | 18.54 | 9.90 |
| ขนาดใหญ่-3 | 20.50 | 15.69 | 6.83 |

ภาคผนวก ข
ผลงานรองงานตีพิมพ์เผยแพร่





ที่ B&D 015/2563

13 มกราคม 2563

เรื่อง ผลการตรวจรับองค์พิมพ์ข้อความใบวิชากรมช่างเทคนิควิทยุและพัฒนฯ

เรียน ศ.ดร.กัญญาภรณ์ ตูโยต

ตามที่ท่านได้ยื่นคำสั่งขอความเรียง "จัดพิมพ์ของปริมาณขอรวมขยายใช้เพื่อต่อพารามิเตอร์ การแตกหักของคอปเปอร์ที่นำมาขอรวมขยายมาใช้ใหม่" เพื่อพิจารณาองค์พิมพ์ใบวิชาของกรมช่างเทคนิควิทยุและพัฒนฯ ตามที่ทราบแล้วนั้น

ผลของงานศึกษาวิชาวิชาวิทยุและพัฒนฯ ของเจ้ากระทรวงช่างเทคนิควิทยุและพัฒนฯ ได้ดำเนินการ พิจารณาเรียบร้อยแล้วจากผู้ที่เกี่ยวข้องแล้ว และได้ส่งตีพิมพ์ใช้ในวิชากรมช่างเทคนิควิทยุและพัฒนฯ ปีที่ 31 ฉบับที่ 3 เดือนกรกฎาคม ศักราช พ.ศ. 2563

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาวกัญญาภรณ์ ตูโยต)

ผู้อำนวยการศูนย์รวมช่างเทคนิควิทยุและพัฒนฯ



วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (EIT)
The Engineering Institute of Thailand under HM, The King's Patronage
481 ถนนพหลโยธิน แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10310
โทรสาร : 0202 219 2113 โทร. โทรสาร : 0202 219 2111 โทรสาร : 0202 219 2111 โทรสาร : 0202 219 2111 โทรสาร : 0202 219 2111 โทรสาร : 0202 219 2111

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

สมชาย กล้าวิทย์กรณ์¹, กำธรเกียรติ มุสิกเศ², สุธี ปิยะพิพัฒน์³, พงศ์พิชญ์ ต่วนญา⁴

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, somchai_k@mail.rmutt.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, kamtornkiat.m@en.rmutt.ac.th

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, pongpitch@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 ทำการปรับปรุงคุณภาพมวลรวมหยาบรีไซเคิลให้อยู่ในสภาวะอิมด้วีวแห้งก่อนการนำไปใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับ 0.6 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงระบอกใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกล 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 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

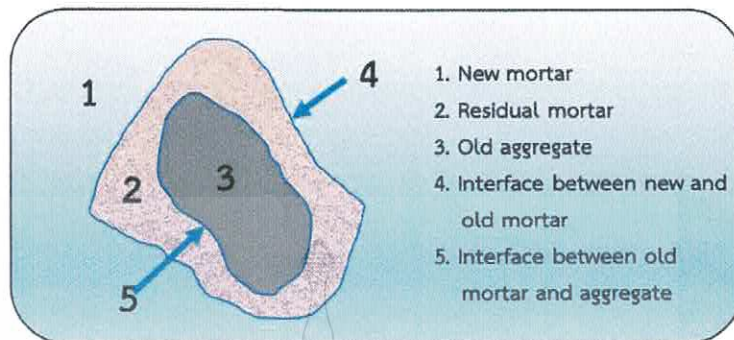


1. บทนำ

มีเหตุผลหลายประการที่จำเป็นต้องศึกษากลศาสตร์การแตกหักของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตจัดเป็นวัสดุประสานจำพวกซีเมนต์ (Cementitious) ซึ่งได้จากการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นซีเมนต์เพสต์ทำหน้าที่ยึดประสานระหว่างมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบและเคลือบเกาะผิวรวมตัวกันเป็นก้อนหลังจากแข็งตัว แต่ภายในซีเมนต์เพสต์จะมีช่องว่างและโพรงซึ่งเป็นผลก่อให้เกิดการหดตัว (shrinkage) การคืบ (creep) และอื่น ๆ ล้วนแต่เป็นปัจจัยต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ผลดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกร้าวหรือตำหนิ (defect) ซึ่งกลศาสตร์การแตกหักเป็นการศึกษาพฤติกรรมรอบ ๆ บริเวณปลายรอยร้าว เมื่อถูกแรงมากระทำในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น แรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือแรงกระทำแบบเข้าไปซ้ำมาเป็นต้น 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 จากข้อมูลของการประกอบการอุตสาหกรรมกรมโม่หิน 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 เพื่อแยกมวลรวมหยาบและซีเมนต์เพสต์ออกจากกัน กรรมวิธีการแยกมวลรวมหยาบออกมาจากซากคอนกรีตเก่านั้น สามารถทำได้ทั้งแยกย่อยด้วยมือหรือเครื่องจักร มวลรวมหยาบที่ได้นี้ บางชิ้น อาจจะมีซีเมนต์เพสต์ของเก่าเกาะยึดอยู่โดยรอบพื้นผิวและสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนดังแสดงด้วยหมายเลข 2 และ 3 ในรูปที่ 1 ปริมาณซีเมนต์เพสต์เก่าที่เกาะอยู่โดยรอบมวลรวมหยาบนั้นส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติที่มากกว่าปกติ



รูปที่ 1 ลักษณะตัวอย่างของมวลรวมหยาบรีไซเคิล

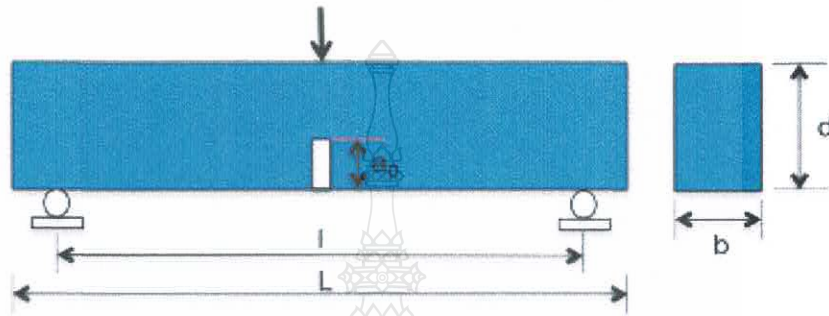
งานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมา ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตรีไซเคิล เช่น Saisut [1] ได้ศึกษา กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากเศษเสาเข็มเก่า พบว่า ค่าดังกล่าวลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 30 และ 33 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบคอนกรีตปกติ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Euathitaporn [2] ซึ่งพบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและเศษมวลเบาเป็นวัสดุผสมรวม จะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตปกติเช่นเดียวกัน การที่มีเศษซีเมนต์เก่าเหลือติดอยู่กับมวลรวมหยาบหลังจากการย่อยคอนกรีตเก่า ทำให้ปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตรีไซเคิลนั้นมีค่าสูง โดยผลการศึกษาจาก 15 ตัวอย่างของ Ravindrarajah และคณะ [3] พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่ามากกว่าค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบปกติประมาณร้อยละ 6.35 ขึ้นอยู่กับปริมาณในการใช้แทนที่มวลรวมหยาบปกติ ในกรณีที่ใช้ปริมาณการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 30 นั้น Hansen และคณะ [4] พบว่าไม่ส่งผลต่อกำลังอัดอย่างชัดเจน นอกจากนี้แล้ว ยังพบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตรีไซเคิลนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตเดิมเพียงอย่างเดียวแต่การย่อยหรือการบดคอนกรีตเก่าก็ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลเองด้วย เนื่องจากถ้ามวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีขนาดเล็กจะทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความหนาแน่นต่ำลงไปด้วย ปริมาณของมวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้น ยังส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตรีไซเคิลด้วย Liu และคณะ [5] พบว่า การใช้ปริมาณมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ร้อยละ 100 นั้น ทำให้กำลังรับแรงดัดลดลงไปประมาณ ร้อยละ 30 เทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบแบบปกติ

งานวิจัยในครั้งนี้ เกิดจากแนวความคิดที่จะศึกษาการนำมวลรวมหยาบจากเศษซากอาคารเก่ามาใช้งานใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยทำการศึกษาปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิล ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลรวมทั้งพารามิเตอร์การแตกหัก (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) ของคอนกรีต ได้อย่างง่ายดาย ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความปลอดภัยในการออกแบบโครงสร้างทั่วไป โดยค่าความเค้นระบุ (Nominal Strength) สามารถคำนวณได้จากค่าของแรงกดสูงสุด (Peak Load) ที่ได้จากการทดสอบคานตัวอย่าง คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลแบบมีรอยบาก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคานด้วยวิธี Three-point Bending Test ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทดสอบแบบ Three-point-bending Test

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

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

เมื่อ σ_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)

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

เมื่อ B และ D_0 คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบและ f'_t คือกำลังรับแรงดึงประลัยของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

หลังจากนั้น จึงนำค่าที่ได้จากสมการที่ 1 มาทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นระบุในแกน Y กับขนาดความสูงของคานตัวอย่างในแกน X ซึ่งปริมาณของข้อมูลในเรื่องขนาดความสูงของคานตัวอย่างที่มากกว่า จะส่งผลให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น แต่ด้วยเหตุผลข้อจำกัดในทางปฏิบัติ อันได้แก่ ขนาดของคานตัวอย่างซึ่งจะต้องเป็นอัตราส่วนที่เท่ากัน ข้อจำกัดในเรื่องขนาดของคานตัวอย่างที่ใหญ่ที่สุดที่จะทำการทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งคำแนะนำสำหรับจำนวนขนาดของคานตัวอย่างที่แตกต่างกันโดยวิธี Size Effect เป็นต้น การศึกษาในครั้งนี้ จึงใช้คานตัวอย่างจำนวน 3 ขนาด จากขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ตามลำดับ ข้อมูลความสัมพันธ์ทั้ง 3 ชุดนั้น โดยทั่วไปแล้ว จะมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลซึ่งยากต่อการนำไปแปลผล

การหาสมการที่ใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลดังกล่าวนั้น 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}) ความยาวประสิทธิภาพของบริเวณการแตกหัก (Effective fracture process zone length, C_f) และค่าพลังงานของการแตกหัก (Fracture energy, G_f) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) - (8) ตามลำดับ

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

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

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

$$K_{Ic} = \frac{Bf'_t}{C_N} \sqrt{D_0g(\alpha_0)} \quad (6)$$

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

$$c_f = \frac{D_0g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \quad (8)$$

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

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 [7] นี้เป็นสะอาด เช่นน้ำประปา ไม่มีสิ่งเจือปน มวลรวมละเอียดหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป นำมาล้างเอาสิ่งเจือปนต่างๆก่อนการใช้ มวลรวมหยาบปกติ (Limestone) ได้มาจากหินธรรมชาติ นำมาล้างเอาสิ่งเจือปนต่างๆ ออกแล้วร่อนให้ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่นำมาใช้ ได้มาจากซากคอนกรีตเก่า ดังแสดงในรูปที่ 2-3 โดยผ่านการย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยแรงงานคน แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว และให้ค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งขนาดโคสดูของมวลรวมหยาบรีไซเคิลไม่ควรเกิน 20 มิลลิเมตร สอดคล้องกับขนาดความกว้างของคานตัวอย่าง



รูปที่ 3 ซากคอนกรีตเก่า



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 มีการรายงานว่า การปรับปรุงสภาพของมวลรวมหยาบรีไซเคิลก่อนการนำไปใช้งาน (Pre-treatment) นั้น จะทำให้คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ได้ มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น วัตถุประสงค์หลักของการปรับปรุงสภาพมวลรวมหยาบรีไซเคิล ก็เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบเก่า Supharee [9]

พบว่าสภาวะปกติของมวลรวมหายบริไซเคิลจะส่งผลให้กำลังอัดต่ำกว่าสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ดังนั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการปรับปรุงสภาพก่อนนำไปใช้งาน วิธีที่ง่ายเสียค่าใช้จ่ายน้อยและได้ผลดีที่สุดคือการล้างทำความสะอาดผิว โดยนำมวลรวมหายบริไซเคิลที่เตรียมไว้ แช่น้ำเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เนื่องจากน้ำที่ถูกกักอยู่ในช่องว่างในมวลรวมหายนั้นไม่ได้มีส่วนในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ เหมือนน้ำที่อยู่ผิว (Free Water)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมหายบริไซเคิล (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

สำหรับการทดสอบหาลังรับแรงอัดนั้น จะใช้ตัวอย่างคอนกรีตริไซเคิลรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ที่อายุของการบ่มไม่น้อยกว่า 28 วัน จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละปริมาณเปอร์เซ็นต์มวลรวมหายบริไซเคิลที่ใช้ รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่างก่อนที่จะทำการทดสอบนั้น แต่งตัวอย่างทั้งหมด ได้ทำการเคลือบผิวด้านบนและล่าง (capping) ด้วยกัมมะถัน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเค้นกดที่บริเวณโคบริเวหนึ่งเฉพาะที่มากเกินไป (stress concentration) อันจะส่งผลให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่เป็นจริง

3.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ จะทำการทดสอบหาลังรับแรงดึงผ่าซีก ซึ่งเป็นการทดสอบแบบทางอ้อม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตริไซเคิลรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร มีความหนา 5 เซนติเมตร ที่อายุการบ่มน้ำไม่น้อยกว่า 28 วัน เช่นเดียวกับตัวอย่างของการรับแรงอัด จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหายบริไซเคิล รวมทั้งสิ้น จำนวน 9 ตัวอย่าง สมการที่ใช้ในการคำนวณหาลังรับแรงดึงทางอ้อมของแท่งตัวอย่าง คือ

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

เมื่อ f'_c คือกำลังรับแรงดึง (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 x 3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ x 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

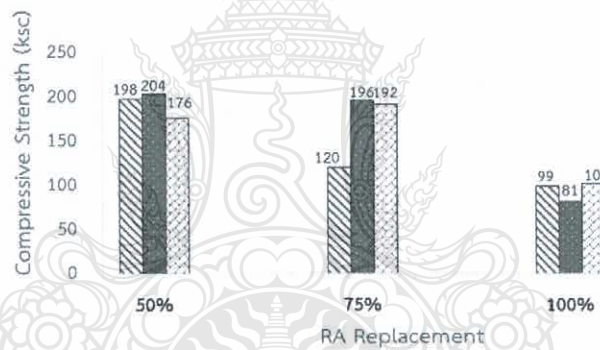
4. ผลการทดสอบ

คอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลในครั้งนี้ ได้จากการนำมวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบปกติในอัตราร้อยละ 50,

75 และ 100 ตามลำดับที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.60 โดยตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะใช้ทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลพื้นฐาน ในขณะที่ตัวอย่างคานที่มีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคานนั้น ใช้สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของการแตกหัก ผลการทดสอบที่ได้ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงกดสูงสุดของคานที่มีรอยบากตามลำดับ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

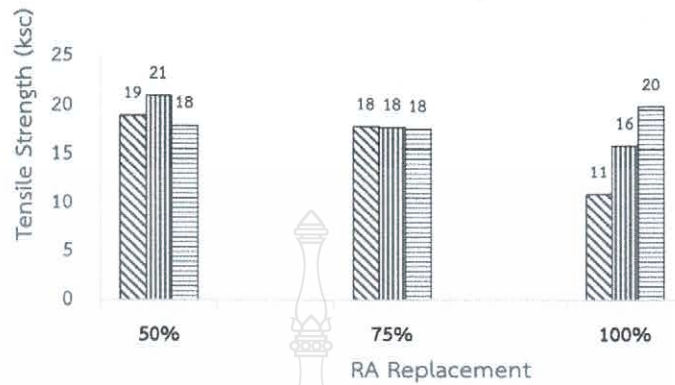
แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลภายหลังจากการวิบัติพบว่า ส่วนใหญ่มีลักษณะของการวิบัติแบบ cone shape กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรีไซเคิลสำหรับปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 50, 75 และ 100 ตามลำดับนั้น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 192.6, 169.3 และ 94 kg/cm² ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6 (ลดทอนของกราฟแต่ละแท่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ) ซึ่งกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรีไซเคิลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์ใหม่กับมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ไม่เพียงพอ เพราะบริเวณผิวโดยรอบยังคงมีซีเมนต์เพสต์เดิมติดอยู่



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิล

4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength)

จากการสังเกต พบว่าตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะเกิดการแตกร้าวเป็นแนวเส้นตรงผ่านบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งคอนกรีตตัวอย่างจำนวน 9 ชิ้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 (ลดทอนของกราฟแต่ละแท่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ) ผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50, 75, และ 100 ค่ากำลังรับดึงทางอ้อมเฉลี่ย มีค่าเป็น 19.3, 18 และ 15.6 kg/cm² ตามลำดับ กำลังรับแรงดึงของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลมีแนวโน้มที่ลดลง 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

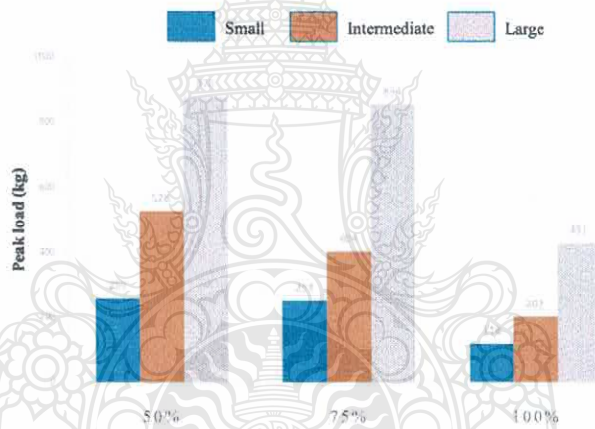
ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในคานตัวอย่างพบว่า มีแนวโน้มที่ลดลง ตามปริมาณการแทนที่ของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 10 แสดงค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของคานตัวอย่างจำนวน 27 ตัวอย่าง โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 259, 253 และ 118 kg สำหรับคานขนาดเล็ก มีค่าเฉลี่ยเป็น 528, 404 และ 202 kg สำหรับคานขนาดกลาง และมีค่าเฉลี่ยเป็น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



รูปที่ 8 การจัดเตรียม Three-point Bending Test



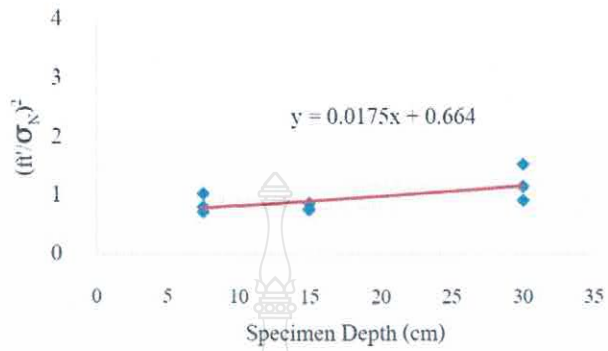
รูปที่ 9 คานตัวอย่างขนาดกลางหลังการวิบัติ



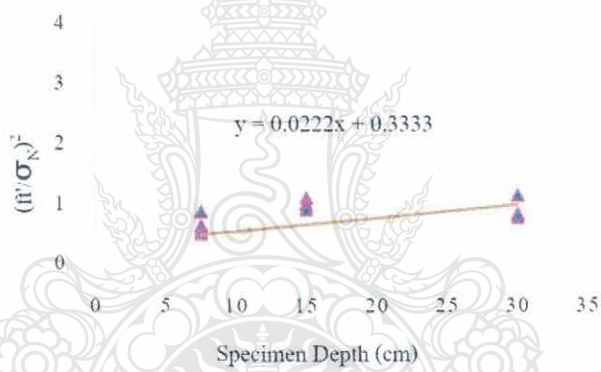
รูปที่ 10 แรกกสูงสุดเฉลี่ยของคานตัวอย่างทั้ง 3 ขนาด

4.4 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์การแตกหัก (Fracture parameters analysis)

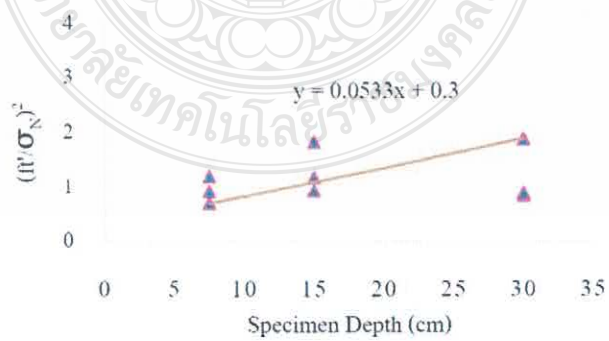
จากการทดสอบคานตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลมีรอยบากบริเวณกึ่งกลางคาน แบบ Three point bending จะมีรูปแบบการวิบัติด้วยแรงดึงแบบโหมดที่ 1 ที่เรียกว่าแบบเปิด (opening mode) ซึ่งพบว่าลักษณะการวิบัติจะเริ่มแตกร้าวจากปลายบริเวณรอยบากและเกิดการการแตกร้าวอย่างรวดเร็วจนถึงขอบหลังคาน ผลการทดสอบแรงกสูงสุดของตัวอย่างคานคอนกรีตมวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถคำนวณค่าความเค้นระบุได้ดังแสดงในตารางที่ 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

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลในคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบแบบนำกลับมาใช้ใหม่โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้ประโยชน์จริงจากการแทนที่มวลรวมหยาบปกติในอัตราที่มากกว่าร้อยละ 30 ไปจนถึงการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมด กำลังรับแรงกดและแรงดึงของคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้ มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของมวลรวมหยาบที่นำไปแทนที่ซึ่งเนื่องมาจากกำลังการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์ใหม่และมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ลดลง ในที่สุด ส่งผลต่อเนื่องให้พารามิเตอร์การแตกหักต่าง ๆ ของคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าลดลงทั้งหมด นอกจากนี้ ยังพบว่า การลดลงทั้งในเรื่องกำลังและพารามิเตอร์การแตกหักของคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับปริมาณการแทนที่ร้อยละ 50 และ 75 แต่จะมีผลชัดเจนเมื่อทำการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมด คำถามสำคัญสำหรับงานวิจัยต่อไปคงไม่ใช่เพียงแค่การศึกษาเพื่อหาปริมาณของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่เหมาะสมสำหรับการนำคอนกรีตรีไซเคิลไปใช้ในทางปฏิบัติสำหรับประเทศไทยเท่านั้น แต่ยังคงอยู่ภายใต้ขอบเขตของความแข็งแรงทางกลและความทนทานต่อการแตกหักที่ยอมรับได้ควบคู่กันไปด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ วท. จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ประจำปี 2561

7. เอกสารอ้างอิง

- [1]. Saisut, T. Recycled coarse aggregate by residual concrete piles. in 9th National Research Conference. 2012. Kasetsart University, Kampangsan 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]. Suphatee, 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.

ประวัติผู้เขียน

| | |
|--------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล | นาย ยอดชาย สี่พันตร |
| วัน เดือน ปีเกิด | 6 พฤษภาคม 2518 |
| ที่อยู่ | 67 ม.13 ต.ทรายขาว อ.สอยดาว จ.จันทบุรี 22180 |
| การศึกษา | ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ประสบการณ์การทำงาน | ปัจจุบันทำงาน บริษัท เอ แอนด์ อี ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด ควบคุม งานปรับปรุงต่อเติมอาคารศาลจังหวัด ชลบุรี |
| เบอร์โทรศัพท์ | 084-7806545 |
| อีเมล | yodchai_s@mail.rmutt.ac.th |

